



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola d'Enginyeria de Telecomunicació  
i Aeroespacial de Castelldefels

# TRABAJO DE FIN DE GRADO

**TÍTULO DEL TFG:** Control y prevención de aludes mediante tecnología dron

**TITULACIÓN:** Grau en Enginyeria d'Aeronavegació

**AUTORES:** Maria Casanovas Crespo  
Bernat Olivé Roig

**DIRECTORES:** Carlos Ferraz Pueyo

**SUPERVISOR:** Jaime Oscar Casas Piedrafita

**FECHA:** 8 de febrer de 2018



**Título:** Control y prevención de aludes mediante tecnología dron

**Autores:** Maria Casanovas Crespo  
Bernat Olivé Roig

**Directores:** Carlos Ferraz Pueyo

**Supervisor:** Jaime Oscar Casas Piedrafita

**Fecha:** 8 de febrer de 2018

## Resumen

La propuesta de control y prevención de aludes mediante tecnología dron, surge con la idea de superar los retos y las carencias actualmente existentes, que dificultan el control y seguimiento de las avalanchas de nieve, y que suponen un alto riesgo tanto para la seguridad de las zonas dónde se producen.

Este propósito se ha realizado a través de un sistema de control, formado por balizas dotadas de sensores ultrasónicos y de temperatura, que se comunican con un dron que facilita la información obtenida sobre las características del estado del manto nivoso, y a través de un seguimiento continuo de la actividad de la zona, con un vuelo adaptado diseñado a través de una interfaz creada para este proyecto, que permite obtener una resolución homogénea en la fotogrametría, para el control preciso y el pronóstico detallado del estado de riesgo que podría sufrir una zona cubierta de nieve.





**Title :** Control and prevention of avalanches using drone technology

**Authors:** Maria Casanovas Crespo  
Bernat Olivé Roig

**Advisors:** Carlos Ferraz Pueyo

**Supervisor:** Jaime Oscar Casas Piedrafita

**Date:** February 8, 2018

## Overview

The proposal of control and prevention of avalanches using drone technology, arises with the idea of overcoming the challenges and the existing deficiencies, which make difficult the control and monitoring of snow avalanches, and that suppose a high risk for the safety of the affected areas.

This purpose has been realized through a control system, formed by beacons equipped with ultrasonic and temperature sensors, which communicate with a drone that facilitates the information obtained on the characteristics of the state of the snowpack, and through a continuous monitoring of the zone activity, with an adapted flight designed through a software created for this project, that allows to obtain an homogenous resolution in the photogrammetry, for the precise control and the detailed prognosis of the state of risk that an area covered with snow could suffer.



*Bernat Olivé*

Als meus pares, Montserrat i Pere, que sempre m'han recolzat, fins i tot quan m'havia equivocat... Sobretot quan m'havia equivocat. Sense ells res d'això no hauria estat possible.

A les meves germanes, Clàudia i Paula, per fer que els dinars familiars siguin de tot menys avorrits.

A la Maria Casanovas, per compartir amb mi tot el que ha implicat fer aquest projecte.

A la meva gran amiga Verónica Martín, ella ja sap per què.

I a Jordi Frach, el meu professor de la ESO, a qui una vegada vaig prometre que li dedicaria un projecte. Sóc un home de paraula.

*Maria Casanovas*

A la meva mare Pepa Crespo, al meu pare Albert Casanovas i a la meva germana Milena Casanovas, que sempre m'han donat tot el seu ajut i recolzament.

Al meu cunyat Àlex, perquè sempre puc comptar amb tot el seu afecte i els seus ànims.

Al Bernat Olivé, per la complicitat i amistat compartida durant tots aquests anys (i els que vénen).

A totes les companyes de l'equip de bàsquet, que m'han animat i donat força en els moments complicats. Gràcies Troupe!



# ÍNDICE GENERAL

<b>CAPÍTULO 1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Problema	1
1.2. Estado del arte	3
1.2.1. Clasificación de aludes	3
1.2.2. Niveles de riesgo	4
1.3. Objetivos	6
<b>CAPÍTULO 2. Solución tecnológica</b>	<b>9</b>
2.1. Sensórica	9
2.1.1. Radar de Onda Continua	9
2.1.2. Matriz de electrodos	12
2.1.3. Ultrasonidos	14
2.2. Validación experimental	16
2.2.1. Resultados experimentales. Experimento 1	17
2.2.2. Resultados experimentales. Experimento 2	18
2.3. Diseño final	20
<b>CAPÍTULO 3. Desarrollo técnico</b>	<b>21</b>
3.1. Obtención de datos	21
3.2. Sistema de balizamiento y plataforma	22
3.3. Operativa	28
<b>CAPÍTULO 4. Desarrollo operacional</b>	<b>31</b>
4.1. Metodología	31
4.1.1. LIDAR	31
4.1.2. Aerotriangulación	32
4.2. Operativa del proyecto	33
4.3. Algoritmo	36
4.4. Plataforma	42

<b>4.5. Validación del método</b>	<b>45</b>
4.5.1. Funcionamiento de Digital COMBO	49
<b>Conclusiones</b>	<b>55</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>59</b>
<b>APÉNDICE A. Datasheets</b>	<b>65</b>
A.1. Sensor de ultrasonidos SR50	65
A.2. Sensor de ultrasonidos HC-SR04	67
A.3. Sensor de ultrasonidos MB1040	70
A.4. Sensor de ultrasonidos JSN-SR04T-2.0	72
A.5. Sensor de temperatura DS18B20	72
A.6. Placa LoPy	75
A.7. Mavic Pro Platinum	77
A.8. DJI S900	78
<b>APÉNDICE B. Tablas del pronóstico de riesgo de aludes</b>	<b>79</b>
<b>APÉNDICE C. Código del algoritmo implementado en DigitalCOM-BO</b>	<b>87</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Mapa de promedios anuales de víctimas mortales por aludes (en negro) y de regiones afectadas por accidentes por aludes (en rojo).	2
1.2	Evolución del número de víctimas mortales por aludes en EEUU (1950-2013).	2
1.3	Incremento del riesgo en la escala Norteamericana de Peligro de Aludes.	6
2.1	Esquema de la instalación de un radar FMCW para analizar el estado del manto nivoso.	10
2.2	Grafico de los diferentes estratos de la nieve visto por un FMCW.	10
2.3	Esquema del funcionamiento de un Snow Micro Penetrometer.	11
2.4	Comparación entre resultados obtenidos por FMCW (izquierda) y SMP (derecha).	12
2.5	Esquema de la distribución de la matriz de electrodos para observar variaciones entre dos medios líquidos.	13
2.6	Fotografía de la distribución de la matriz de electrodos para observar variaciones entre dos medios líquidos.	13
2.7	Esquemática simple del funcionamiento de un sensor de ultrasonidos.	14
2.8	Esquema de un pulso de ultrasonidos a través de nieve.	14
2.9	Imágenes del sensor de ultrasonidos SR50.	15
2.10	Comparativa entre los principales métodos de la solución tecnológica.	16
2.11	Fotografía de la distribución de sensores para el Experimento 1.	18
2.12	Relación entre cantidad de nieve y velocidad de señal (experimento 1).	18
2.13	Sensor <i>MB1040 LV-MaxSonar-EZ4</i> .	20
3.1	Esquema del proceso de obtención de datos entre dispositivos.	21
3.2	Diagrama de funcionamiento del formato del sistema de balizamiento y plataforma.	23
3.3	Interconexión de los distintos dispositivos del sistema de balizamiento y plataforma.	26
3.4	Reproducción a escala de un prototipo de baliza simple.	27
3.5	Mapa de la región de baqueira-beret para el estudio de la distribución del sistema de balizamiento.	29
3.6	Propuesta de distribución de balizas en la zona de Blanhíblar.	29
4.1	Nube de puntos con diferentes alturas obtenida mediante un sensor LIDAR.	32
4.2	Ejemplo de aerotriangulación: generación de coordenadas terrestres con gran precisión mediante la superposición de imágenes tomadas de forma perpendicular.	32
4.3	Ortomosaico.	33
4.4	Plano de las curvas de nivel.	33
4.5	Modelo Digital del Terreno.	33
4.6	Plan de vuelo de 28 pasadas a altura constante para la aerotriangulación de la estación de esquí de Aramón-Cerler.	34
4.7	Ejemplo de un vuelo con altitud constante y uno con altitud variable.	35

4.8 Diferencia entre vuelo con altitud constante y con altitud variable. Este último permite una toma de datos en las mismas condiciones a todos los puntos, reduciendo la variación de resolución. . . . .	36
4.9 Plan de vuelo de 5 <i>waypoints</i> generado por Mission Planner. . . . .	37
4.10 Modelo Digital de Superficie generado por el software Global Mapper. . . . .	38
4.11 Ejemplo de un FlightPlan de 15 waypoints creado en Mission Planner. . . . .	39
4.12 Resultado de la optimización con Digital COMBO del plan de vuelo de la figura 4.11. . . . .	40
4.13 Ejemplo en el que tanto el <i>waypoint</i> 4 como el 5 se consideran “intocables”, ya que al pasar por ellos el dron cambia la orientación de su vuelo. . . . .	40
4.14 Ejemplo de una colisión con el terreno producto de la eliminación de un <i>waypoint</i> . El <i>waypoint</i> del medio no podrá eliminarse y pasará a considerarse “intocable”. . . . .	41
4.15 Plan de vuelo final optimizado con Digital COMBO del plan de vuelo de la figura 4.11. . . . .	41
4.16 Perfil de elevación del plan de vuelo inicial del ejemplo de la figura 4.11. . . . .	41
4.17 Perfil de elevación del plan de vuelo resultante de Digital COMBO (figura 4.15)	42
4.18 Ratio de disminución de la capacidad de una batería LiPo en función de la temperatura ambiente. . . . .	44
4.19 Adhesivos aislantes para el mantenimiento de la batería. . . . .	45
4.20 Polígono generado por Mission Planner en el terreno montañoso de Cardona. .	45
4.21 Dron DJI-S900 utilizado en el vuelo de Cardona, equipado con una cámara multiespectral MicaSense. . . . .	46
4.22 Gráfico de la altura respecto al punto en que el dron ha despegado (home) en función del tiempo. Resultados para el plan de vuelo 1. . . . .	47
4.23 Modelo Digital del Terreno generado por Google Earth. . . . .	48
4.24 Gráfico de la altura respecto al punto en que el dron ha despegado (home) en función del tiempo. Resultados para el plan de vuelo 3. . . . .	48
4.25 Dron DJI-S900 realizando el plan de vuelo 3 en Cardona. . . . .	49
4.26 Plan de vuelo generado en un polígono mediante el comando <i>CAM_TRIGG_DIST</i>	50
4.27 Plan de vuelo generado en un polígono mediante el comando <i>DO_DIGICAM_CONTROL</i>	51
4.28 Carencia generada por el comando <i>DO_DIGICAM_CONTROL</i> en un plan de vuelo.	51
4.29 Interfaz gráfica para los usuarios de Digital COMBO. . . . .	52
4.30 Plan de vuelo 3, siguiendo el terreno a 100 metros de altitud en todo momento en la zona de Cardona. . . . .	53
4.31 Plan de vuelo 4, optimización del plan de vuelo 3 en la zona de Cardona. . . .	53
4.32 Comparativa en 3 dimensiones del plan de vuelo 3 en la zona de Cardona. . .	54
4.33 Comparativa en 3 dimensiones del plan de vuelo 3 en la zona de Cardona. . .	54
A.1 Sensor de ultrasonidos MB1040. . . . .	70



# ÍNDICE DE CUADROS

1.1	Escala Europea de Peligro de Aludes. . . . .	5
1.2	Escala Norteamericana de Peligro de Aludes (utilizada en los EEUU y en Canadá)	6
2.1	Resultados del análisis del pulso de ultrasonidos a través de nieve. . . . .	15
2.2	Resultados de los tiempos de recepción de la señal de ultrasonidos en las diferentes pruebas del primer experimento. . . . .	17
2.3	Resultados de velocidades de señal con nieve fresca utilizando el <i>HC-SR04 Arduino Ultrasonic Sensor</i> . . . . .	19
2.4	Resultados de velocidades de señal con nieve húmeda utilizando el <i>HC-SR04 Arduino Ultrasonic Sensor</i> . . . . .	19
3.1	Parámetros para el cálculo de consumo del sistema. . . . .	25
4.1	Tabla generada por Digital COMBO a partir del plan de vuelo de la figura 4.11 .	39
4.2	Características estructurales del dron DJI-S900. . . . .	43
4.3	Características del motor del dron DJI-S900. . . . .	43
4.4	Características ESC del dron DJI-S900. . . . .	43
4.5	Parámetros de vuelo del dron DJI-S900. . . . .	43
4.6	Características de la batería <i>Tattu Plus LiPo 6S1P</i> . . . . .	44



# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Problema

Los aludes, también conocidos como avalanchas de nieve, se sitúan en el marco de los fenómenos naturales gravitacionales, cuyo riesgo ha existido a lo largo de la historia. Entendemos por alud, una masa de nieve que se desplaza ladera abajo, pudiendo movilizar, a su paso, parte del sustrato de la tierra o cualquier objeto que se encuentre en la pendiente, debido mayormente a la carencia de homogeneidad del manto nivoso<sup>1</sup>, que se ve arrastrado por el propio peso de la nieve, o por factores accidentales como la caída de un árbol o una roca. De esta manera, estos procesos físicos, envueltos en el medio natural, se identifican como fuertes contingencias, generadas en todo el mundo, que ocasionan numerosas pérdidas humanas y materiales, además de un fuerte impacto socioeconómico.

Se conoce y se ha documentado que solo en Europa existen más de un centenar de víctimas mortales cada año causadas por estos fenómenos. Esta cifra viene dada por la suma de víctimas de distintas regiones donde, por ejemplo, los accidentes suceden con frecuencia como son los Alpes, Suiza, Austria o España, o bien en regiones donde se sufre algún accidente que, mayormente, podría haber sido evitado como en Italia o Francia. Por ejemplo, en el año 1999, en Suiza hubo 12 víctimas mortales en Evolene, en Austria evacuaron a 10.000 personas y se hallaron 50 personas sepultadas por la nieve de las cuales 38 fallecieron en Galtuer y Valzur, y en Francia, en Haute-Savoie, fallecieron 12 personas y, 17 chalets, construidos en una zona clasificada como 'sin riesgo', fueron sepultados. Más recientemente, en 2017, el número de víctimas superaba los 150 entre diversos accidentes como en Italia, que dejó 29 víctimas y 11 heridos, Afganistán, dónde murieron más de 100 personas, Japón, con 8 fallecidos y más de 30 heridos, en Colorado, dónde murieron 14 personas o bien Mongolia, lugar en que en un accidente provocó la muerte de 17 excursionistas y no dejó supervivientes [1].

Estas cifras se han extrapolado en todo el mundo, a través de los promedios anuales de víctimas causadas por estos fenómenos, que pueden actuar como indicadores para referenciar el grado de vulnerabilidad de algunas zonas. Se podrían remarcar regiones con promedios anuales significativos (figura 1.1) como por ejemplo Austria con un promedio de 36 víctimas, Suiza y Los Alpes con 135, o Estados Unidos con 28 víctimas cada año [2].

Además de estas pérdidas humanas, como antes se ha comentado, los aludes producen elevados daños materiales en poblaciones y bosques. Por ejemplo, entre Austria y Suiza, los costes de las medidas preventivas y de los gastos ocasionados por dichos fenómenos durante las últimas décadas, se calcula que superan los 1.7 billones de euros, ya que, sólo en Austria, el cierre de un valle altamente afectado puede suponer un coste de aproximadamente 7.6 millones de euros por semana.

---

<sup>1</sup>Manto nivoso: Superposición de capas de nieve, correspondientes a las distintas nevadas que se producen a lo largo de la temporada (invernal).

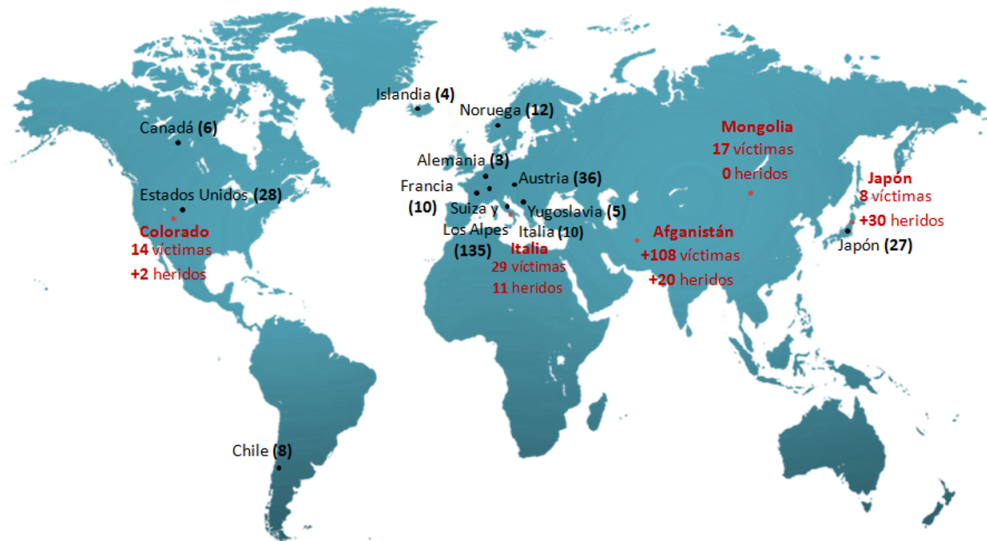


Figura 1.1: Mapa de promedios anuales de víctimas mortales por aludes (en negro) y de regiones afectadas por accidentes por aludes (en rojo).

Si analizamos las causas de estos siniestros, un factor impactante es que el 90 % de las víctimas se producen por la rotura de una placa, originada por ellos mismos o por sus propios compañeros [3]. Esto se debe a que no todas las avalanchas se han podido prevenir ni detectar antes de que se desencadenen, ya que actualmente se hace el análisis de la región, pero no se concreta el nivel de riesgo por zonas. Esto supone una carencia de información para los usuarios, necesaria para su toma de decisiones, y para no poner en riesgo su vida o la de los que están a su alrededor.

En cuanto al nivel de riesgo por zonas, no es común detallar la información por pequeñas áreas del terreno, sino que se obtiene el estudio de la región entera, como podría ser una estación de esquí completa y sus alrededores, o una serie de valles de una cordillera, y se valora el nivel de riesgo general, que suele tener un ciclo repetitivo. Esto conlleva que, en muchas ocasiones, en las estaciones de esquí y su entorno, o en zonas más inexploradas o inciertas, el nivel de riesgo establecido por zonas no corresponda al nivel de riesgo real que pueda sufrir una zona determinada.

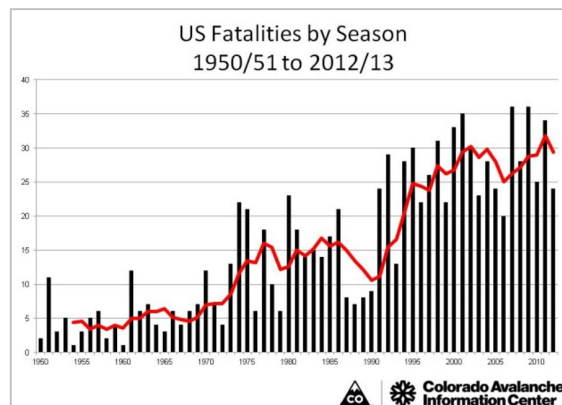


Figura 1.2: Evolución del número de víctimas mortales por aludes en EEUU (1950-2013).

Siguiendo con una visión global de la situación, se ha observado que el aumento del turismo y el fomento de los deportes de montaña, a través de la promoción del esquí en las escuelas o promoviendo las vacaciones de invierno en la nieve, han supuesto un aumento de la cifra de clientes y turistas de montaña. Este incremento también se ve reflejado en el número de víctimas que se producen cada año, por ejemplo, en EEUU, el cual sigue una tendencia creciente (figura 1.2). De esta forma, la industria de la nieve se enfrenta a un crecimiento a largo plazo, con lo que este mercado necesita transformarse, con iniciativas globales que permitan potenciar el sector, enfocándose a los diferentes rangos de edad, las nuevas generaciones, etc.

Así pues, entendiendo la situación en la que se ve envuelto este sector, se manifiesta la necesidad de ofrecer un sistema, capaz de registrar los niveles de riesgo distribuidos por zonas, detectar y controlar avalanchas de nieve, intentando evitar las tragedias que estas pueden propiciar.

## 1.2. Estado del arte

Actualmente, para minimizar el impacto ocasionado por estos fenómenos, se toma como medida mitigadora el estudio semanal de las zonas nevadas, el cual consiste en realizar manualmente una extracción del perfil del manto nivoso con equipos de personas en diversas zonas de alta montaña. Estos equipos suelen estar formados por parte de los cuerpos de seguridad de alta montaña, investigadores de una universidad o centro de investigación o usuarios que colaboran en pistas de esquí.

Para la realización del estudio se elige una zona de riesgo, las cuales suelen situarse en cotas elevadas con declives considerables, y se sube hasta el lugar donde los investigadores introducen una sonda graduada en la nieve, para medir las características de la nieve.

Este procedimiento ayuda a recoger una muestra de nieve de cada capa, con lo que se puede hacer la extracción de un perfil estratigráfico, que nos permitirá conocer las características de los diferentes estratos<sup>2</sup> a diferentes alturas, y así determinar si hay posibilidad de que se genere un alud en la zona en un intervalo de entre ocho o nueve días [4]. Sin embargo, el análisis no aplica a los puntos de mayor riesgo para evitar posibles desprendimientos que afecten a la seguridad, por lo que el nivel de riesgo es una estimación, y se toma como valor final el más restrictivo.

### 1.2.1. Clasificación de aludes

Además del estudio de las zonas nevadas hay que tener en cuenta que existen dos tipos de aludes en dichas zonas, cuya diferenciación se basa en su magnitud:

- **Alud superficial:** Sólo se desplaza una parte del manto nivoso.
- **Alud de fondo:** Todo el manto se desplaza de manera súbita e incluso violenta, movilizándolo y erosionando el sustrato de la ladera.

---

<sup>2</sup>Cada una de las capas horizontales de espesor uniforme en que se presenta dividido el manto nivoso.

Y dentro de esta clasificación, se podría distinguir entre otros tipos, los cuales difieren en el método de identificación:

- **Aludes de repetición:** Su ubicación está establecida dentro de un área determinada, y es la misma cada temporada, por lo que no es necesario buscar puntos de origen, tan solo saber cuándo van a originarse.
- **Aludes espontáneos:** Se suelen dar tras nevadas de más de 50 centímetros, y son impredecibles, ya que no tienen por qué originarse en puntos conocidos de aludes de repetición, no pudiéndose aplicar en estos casos la extracción del perfil debido a la imposibilidad de ubicarlos.

Finalmente, para tener opción a un pronóstico más exacto y válido sobre el estado de los estratos, se podrían distinguir y clasificar los inicios y el desarrollo de la generación de los aludes:

- **Aludes de nieve fresca:** Este tipo de avalanchas se generan cuando el peso de la nieve acumulada, particularmente sobre un manto liso, cede ante la fuerza de la gravedad. Se producen generalmente después de fuertes nevadas.
- **Aludes de placa:** Estos aludes son los más peligrosos y también los más frecuentes. Se forman generalmente cuando sopla el viento, fragmentando y compactando los cristales de hielo en estratos rígidos y frágiles, que se desprenden del resto del manto nivoso y se deslizan sobre el suelo o sobre la nieve existente.
- **Aludes de nieve húmeda:** Estas avalanchas se activan con el aire o el viento caliente, el sol y el sobrepeso. Cuando suben las temperaturas y las pendientes quedan expuestas a estos factores, estas se deslizan lentamente generando así un alud.

Conocer la magnitud y los inicios de los aludes dentro de las zonas de nieve, nos da una visión más amplia y detallada sobre el grado de peligro que se puede sufrir en la zona afectada. De esta forma, el pronóstico de riesgo incrementará su fiabilidad, y se podrá actuar de forma más eficiente ante las situaciones adversas que dichos fenómenos puedan ocasionar.

### 1.2.2. Niveles de riesgo

Durante el estudio descrito en la sección 1.2. se identifican diversos factores involucrados en el desarrollo de los aludes:

- El espesor, la estructura y la composición del manto nivoso.
- La inclinación y forma de los desniveles.
- La existencia o no de vegetación.
- Las condiciones meteorológicas.

En función de los niveles de riesgo y los niveles de la zona de salida<sup>3</sup>, el Plan Nacional de Predicción y vigilancia de Fenómenos Meteorológicos Adversos de AEMET, establece unos umbrales y unos niveles de alerta [5].

Actualmente, Europa ha adoptado una escala uniforme conocida como la Escala Europea de Peligro de Aludes que incluye cinco grados de peligro, siendo el nivel 1 el de menor riesgo y el nivel 5 el de máximo peligro.

Índice de peligro	Riesgo	Estabilidad del Manto nivoso	Probabilidad de desencadenamiento
	<b>DÉBIL</b>	Bien estabilizado en la mayoría de las vertientes.	Sólo en pendientes muy propicias y sobre todo, a causa de fuertes sobrecargas. De forma natural sólo coladas o pequeños aludes.
	<b>LIMITADO</b>	En algunas pendientes suficientemente propicias a aludes, moderadamente estabilizado.	Sobre todo por sobrecargas fuertes y en algunas pendientes cuyas características se describen normalmente en el boletín. No se esperan aludes espontáneos de gran amplitud.
	<b>NOTABLE</b>	En numerosas pendientes suficientemente propicias a aludes, moderado o débilmente estabilizado.	Incluso por sobrecargas débiles y en numerosas pendientes descritas en el boletín. En ciertas situaciones son posibles algunos aludes espontáneos de dimensiones medias y a veces grandes.
	<b>FUERTE</b>	En la mayoría de las pendientes suficientemente propicias a aludes, débilmente estabilizado.	Incluso por sobrecargas débiles en la mayoría de las pendientes suficientemente propicias a los mismos. Posibilidad de aludes espontáneos de dimensiones medias y a veces grandes.
	<b>MUY FUERTE</b>	Inestabilidad generalizada del manto nivoso.	Se esperan aludes espontáneos numerosos y grandes incluyendo zonas con pendientes poco propicias.

Cuadro 1.1: Escala Europea de Peligro de Aludes.

Por otra parte, en los Estados Unidos (EEUU) y en Canadá se utiliza la Escala Norteamericana de Peligro de Aludes [6], la cual tiene definiciones muy similares a la escala Europea y también incluye cinco grados de peligro, siendo 1 el más débil y 5 el de riesgo extremo:

<sup>3</sup>Nivel de salida: La zona de salida es la primera fase de un alud, y se define como la parte del terreno donde se inicia el alud y donde la masa de la nieve sufre una aceleración considerable.

North American Public Avalanche Danger Scale				
Avalanche danger is determined by the likelihood, size and distribution of avalanches.				
Danger Level		Travel Advice	Likelihood of Avalanches	Avalanche Size and Distribution
5 Extreme		Avoid all avalanche terrain.	Natural and human-triggered avalanches certain.	Large to very large avalanches in many areas.
4 High		Very dangerous avalanche conditions. Travel in avalanche terrain <u>not</u> recommended.	Natural avalanches likely; human-triggered avalanches very likely.	Large avalanches in many areas; or very large avalanches in specific areas.
3 Considerable		Dangerous avalanche conditions. Careful snowpack evaluation, cautious route-finding and conservative decision-making essential.	Natural avalanches possible; human-triggered avalanches likely.	Small avalanches in many areas; or large avalanches in specific areas; or very large avalanches in isolated areas.
2 Moderate		Heightened avalanche conditions on specific terrain features. Evaluate snow and terrain carefully; identify features of concern.	Natural avalanches unlikely; human-triggered avalanches possible.	Small avalanches in specific areas; or large avalanches in isolated areas.
1 Low		Generally safe avalanche conditions. Watch for unstable snow on isolated terrain features.	Natural and human-triggered avalanches unlikely.	Small avalanches in isolated areas or extreme terrain.
Safe backcountry travel requires training and experience. You control your own risk by choosing where, when and how you travel.				

Cuadro 1.2: Escala Norteamericana de Peligro de Aludes (utilizada en los EEUU y en Canadá)

Como se observa en la figura 1.3, ambas escalas de peligro no són lineales, es decir, el riesgo incrementa dos veces por cada incremento de grado de peligro. Esto significa que, el riesgo que se asume con grado 2 es dos veces mayor que con grado 1, y cuatro veces más si nos situamos en el grado 3 [7]. Un dato que refleja estas magnitudes es que el 74 % de los accidentes se producen ante un riesgo 2 y 3.

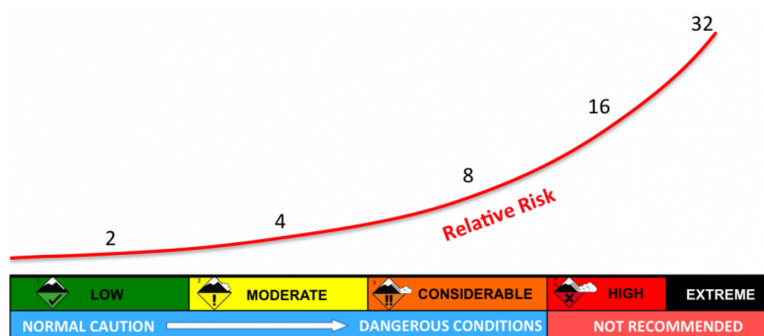


Figura 1.3: Incremento del riesgo en la escala Norteamericana de Peligro de Aludes.

La clasificación anterior (sección 1.2.1.) también nos proporciona facilidad para la determinación del grado de peligro, ya que, por ejemplo, si nos enfrentamos a una clasificación de alud de placa, entenderemos que el grado de peligro deba aumentar.

### 1.3. Objetivos

La propuesta de control y prevención de aludes lleva consigo un importante grado de innovación, investigación y de desarrollo, tanto técnico como operacional y surge con la



idea de superar las dificultades y carencias actualmente existentes para el control de las avalanchas de nieve, que suponen un alto riesgo tanto para la seguridad en las zonas de alta montaña como para la economía de sus zonas adyacentes.

Los objetivos señalados, que se quieren alcanzar con este proyecto, y que definen el trazado de toda la ejecución, son los siguientes:

- **Detección preventiva de riesgos:** Obtener información sobre el estado de los estratos del manto nivoso, para estudiar sus características y poder concluir con el grado de riesgo de la zona estudiada.
- **Mejora en la distancia de actuación:** Alcanzar más distancia para la comunicación, permitiendo la obtención de datos desde estaciones de control alejadas de la zona de riesgo a analizar.
- **Reducción en el tiempo de aplicación del servicio:** Aumentar la eficiencia y reducir el tiempo de actuación en la obtención de los parámetros de estado del manto nivoso.
- **Aumento de la precisión y la calidad de los estudios:** Alcanzar puntos de alto riesgo para el estudio del manto nivoso, proporcionando una mayor precisión de los datos obtenidos y, por consiguiente, mayor fiabilidad en los resultados y la determinación del nivel de riesgo, en comparación al sistema actual de toma de datos (sección 1.2).
- **Aumento de la seguridad:** El alcance de este objetivo se distribuye entre la seguridad laboral, la seguridad de los usuarios y la seguridad económica derivada de la actividad de la zona. Concretamente:
  - Seguridad laboral: Facilitar la información a una estación de tierra. Los investigadores no deberán situarse en los puntos críticos ni en las zonas de riesgo para su estudio.
  - Seguridad de los usuarios: Saber con antelación los riesgos de la zona, y tener un sistema de control y prevención íntegro y fiable.
  - Seguridad económica: Conocer bien los riesgos de las zonas de actividad permite disminuir los cierres innecesarios de algunas pistas de esquí o incluso de carreteras próximas a dicha zona.

Para cumplir con estos objetivos, esta iniciativa combina dos métodos, los cuales consisten en la obtención de las características del estado del manto nivoso a través de una distribución de sondas y la fotogrametría de dichas zonas:

- **Sistema de balizamiento:** Por una parte, se requiere de una selección coordinada de sondas repartidas por sectores<sup>4</sup> y distribuidas estratégicamente por toda el área de ejecución, dotadas de varios sensores ultrasónicos y de temperatura. Su función principal consiste en recoger los datos compilados durante el período de actividad

---

<sup>4</sup>Se considera un sector como una zona de la montaña donde la orografía es similar, es decir, la inclinación y la orientación del terreno se mantienen. También podemos referirnos a un sector con la palabra 'pala', cuya definición es equiparable.

del sistema, los cuales indican las características del estado de los estratos de nieve y, posteriormente, enviarlos a través de la comunicación con dron a un sistema capaz de procesar esta información y generar un nivel de riesgo. El dron facilita la comunicación con estas balizas, ya que permite transmitir información a mayor distancia que desde una estación de control fija, en la que el emisor (baliza) y el receptor (dron) estarían en contacto con el suelo y el rango de comunicación se reduciría. Por ejemplo, se puede comunicar un sector de balizas desde una distancia de 3.5 km de la estación de control de tierra, con un vehículo que tenga un alcance de emisión radio igual o superior a esa distancia, y que mantenga una diferencia de altura respecto de la baliza en el suelo de unos 80 m.

Una vez procesada la información, se deberá elaborar un pronóstico teórico de la situación y el nivel de riesgo de la región analizada. Para ello, se necesita recoger los datos meteorológicos (como la velocidad y dirección del viento, la humedad relativa, etc.) de una estación meteorológica fija sujeta a una región cercana. Asociando estos datos con las características de los estratos, se puede hacer un seguimiento continuo de las condiciones de la región, y determinar con mayor precisión el riesgo existente en cada cara de la montaña y en cada uno de los sectores. Todo esto resultaría beneficioso, sobre todo, en las zonas donde se producen, mayormente, aludes de repetición, aunque no entraría dentro del alcance del proyecto, así como tampoco el software de procesado.

- **Vuelo adaptado y fotogrametría:** Por otra parte, se añade una nueva planificación del plan de vuelo de los UAVs, adaptándolo, con modificaciones de altura, a los terrenos y los desniveles de las zonas de alta montaña, aumentando así el área de visibilidad, llegando a puntos que podían quedar fuera del alcance de un plan de vuelo convencional. Para ello, se ha diseñado un programa que permite enlazar el modelo digital del terreno que se quiere evaluar, con el plan de vuelo de los puntos inicialmente planificados, y de aquí, extraer la combinación entre ambas partes, obteniendo el plan de vuelo final, que nos permitirá realizar un vuelo adaptado, más óptimo y que garantice mayor precisión en el procesado de la fotogrametría.

La fotogrametría nos permite realizar el seguimiento de la evolución del volumen del manto nivoso, lo cual nos permite saber la acumulación que sufre una zona y que, a altos volúmenes, puede suponer mayor probabilidad de la generación de aludes, mayormente espontáneos.

Con estos métodos, la realización de este proyecto apuesta por el desarrollo tecnológico y la modernización de un sector que está creciendo y se está popularizando, procurando su innovación, y un favorable ritmo de evolución comparable con el de otros mercados, como sería incluso el sector de la tecnología UAV.

## CAPÍTULO 2. SOLUCIÓN TECNOLÓGICA

El principal reto tecnológico de este proyecto es conseguir información de las diversas capas del manto nivoso, sean o no visibles, de forma remota y sin necesidad de perforar la nieve. Saber si los estratos del que se compone el manto nivoso están formados por nieve poco densa, nieve muy densa, o si presentan capas de hielo, será determinante a la hora de establecer un pronóstico en cuanto a nivel de riesgo de alud se refiere.

Para cumplir este reto se establecerán una serie de balizas ubicadas en puntos estratégicos de la montaña. En cada una de estas balizas se instalará un sistema de sensores capaz de recopilar datos de los diferentes niveles del manto nivoso, para que puedan ser analizados y se conviertan en información útil para determinar el tipo de medio ubicado en cada estrato.

### 2.1. Sensórica

Existen diversos sensores cuya tecnología puede ayudarnos a obtener datos necesarios para determinar si una zona cubierta de nieve puede sufrir carencias de homogeneidad, que desencadenen la movilización del sustrato. En el siguiente apartado se describen dichas tecnologías y diferentes observaciones, que dan soporte a argumentos que indican el grado de viabilidad de cada sensor dentro de nuestro proyecto.

#### 2.1.1. Radar de Onda Continua

Uno de los principales métodos que se está estudiando actualmente para medir altura y propiedades de las capas del manto nivoso es la utilización de un radar de onda continua (FMCW) con modulación de frecuencia de banda L. En este método, el radar se instala bajo tierra configurado con visión hacia arriba, de modo que las ondas que emita partan del punto en que la nieve toca el suelo (figura 2.1). Esto permite generar un estudio de los datos de todo el manto nivoso, partiendo del nivel del suelo hasta la última capa de nieve que se ha formado.

Esto se determina mediante la influencia de la magnitud y la fase de reflexión de la señal variando su frecuencia. *Robert Okorn, Georg Brunhofer, Thomas Platzer, Achim Heilig, Lino Schmid, Christoph Mitterer, Jürg Schweizer y Olaf Eisen* desarrollaron un algoritmo automatizado y semiautomatizado de seguimiento de superficie de la nieve que permite tener con gran exactitud y de manera muy económica la evolución de la profundidad de la nieve en sitios fijos y específicos y, por lo tanto, la evolución del volumen del manto nivoso [8].

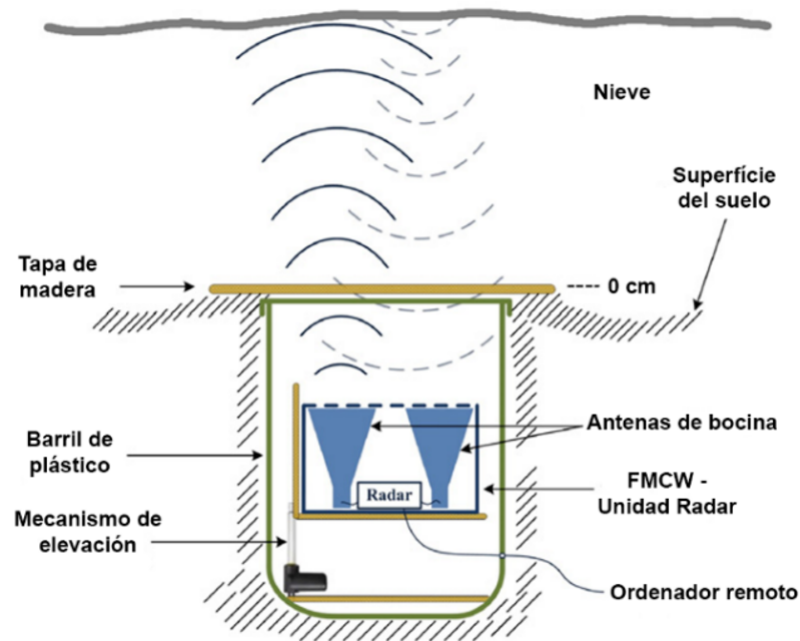


Figura 2.1: Esquema de la instalación de un radar FMCW para analizar el estado del manto nivoso.

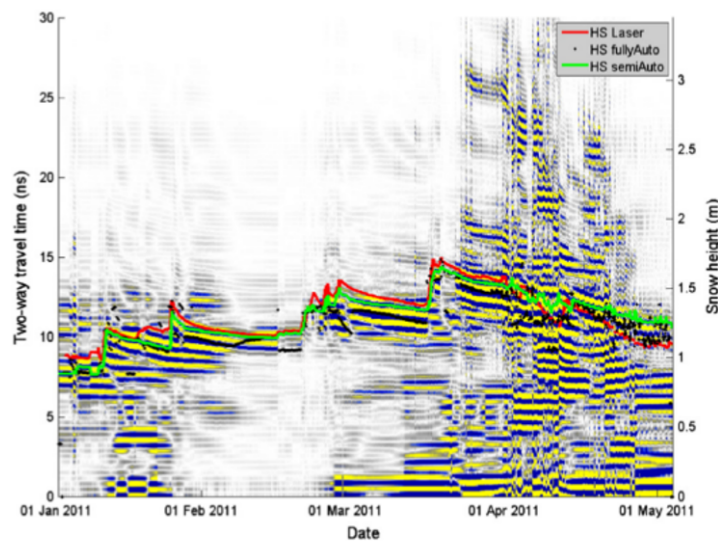


Figura 2.2: Grafico de los diferentes estratos de la nieve visto por un FMCW.

Por otro lado, *P. Marshall, M. Schneebeli, G. Koh, M. Matzl y C. Pielmeier* fueron un paso más allá. El principal objetivo de su método es poder diferenciar, mediante un radar FMCW también, la variación que sufre la dureza de la nieve en función de la altura a la que esta se encuentra. Esta variación nos permitiría distinguir diferentes capas de nieve y, el factor más importante, nos permitiría ubicar placas de hielo dentro del manto nivoso [9].

Cómo punto de partida se propone emular, en la medida de lo posible, los resultados

proporcionados por el sistema SnowMicroPen (Snow Micro Penetrometer, SMP), que introduce un elemento penetrador en la nieve y, mediante la fuerza que este ha de realizar para seguir penetrando, se determina el nivel de dureza de la nieve en cada nivel de profundidad.

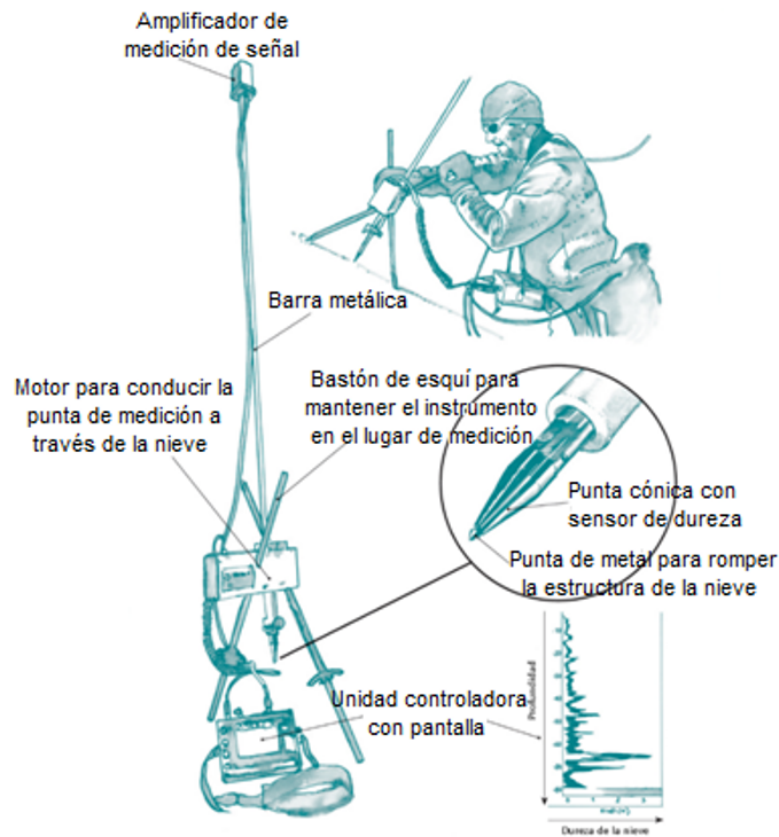


Figura 2.3: Esquema del funcionamiento de un Snow Micro Penetrometer.

Muchos estudios previos ya han mostrado correlaciones entre mediciones del radar y del SMP, sin embargo, la interpretación de la señal del radar sigue siendo un desafío. Esto se debe a que el radar es muy sensible a los contrastes de gran densidad, por lo que las placas de hielo, por ejemplo, provocan fuertes reflejos. Los cambios de densidad poco pronunciados, por el contrario, causan señales de radar difíciles de interpretar. Para ello, se ha desarrollado un algoritmo que, en función de la señal, determina la función de probabilidad de densidad (PDF).

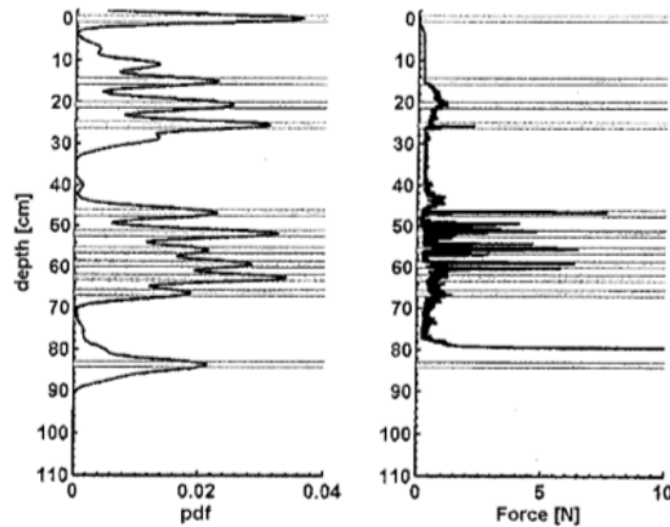


Figura 2.4: Comparación entre resultados obtenidos por FMCW (izquierda) y SMP (derecha).

Aunque no sea del todo exacto es un método que permite detectar picos de densidad y, por lo tanto, posibles placas de hielo y su ubicación en los diferentes niveles de profundidad del manto nivoso.

En conclusión, vemos que con un radar de onda continua es posible medir la profundidad de la nieve y la ubicación de las placas de hielo. Todo ello de forma remota y sin necesidad de tocar físicamente el manto nivoso. Aun así, no debemos olvidar que estamos hablando de sistemas experimentales, que no disponen de suficiente cantidad de muestras para ver probada su eficacia y su uso no está extendido, por lo que el coste económico de implementar dichos sistemas es, de momento, muy elevado. Por otro lado, los sistemas de detección de medio mediante radar tienen un margen de error demasiado elevado para poder determinar con exactitud el tipo de medio.

### 2.1.2. Matriz de electrodos

Otro método muy interesante estudiado para este proyecto es el desarrollado por Ramon Casanella Alonso, profesor de la Universidad Politècnica de Catalunya, quien realizó un estudio que permitía detectar espesor de capas de líquido con diferentes propiedades mediante una serie de electrodos [10]. En el estudio se pretendía correlacionar la variación de campo eléctrico entre dos electrodos si se cambia el medio en el que están ubicados.

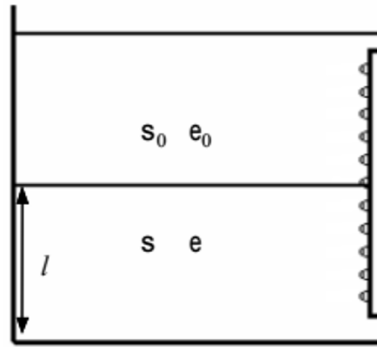


Figura 2.5: Esquema de la distribución de la matriz de electrodos para observar variaciones entre dos medios líquidos.

Realizando un modelo que relacione los parámetros de nivel de líquido y los datos de campo eléctrico de la matriz de electrodos se puede determinar cuándo y cómo cambian las propiedades y, por lo tanto, el medio.

El estudio concluye con el diseño y la implementación de un sensor capaz de determinar, en un tanque lleno de líquido, en qué punto cambia de líquido y cómo lo hace.



Figura 2.6: Fotografía de la distribución de la matriz de electrodos para observar variaciones entre dos medios líquidos.

Se trata de un sistema muy bueno para diferenciar con precisión diferentes tipos de líquido (por ejemplo, agua de aceite), pero su uso con elementos que no sean líquidos no está probado y podría no funcionar con eficacia. También hay que tener en cuenta que, aunque su uso con elementos más sólidos diera resultados positivos, en nuestro proyecto pretendemos diferenciar elementos prácticamente idénticos (nieve y hielo), con lo que el modelo matemático necesario para discernirlos con seguridad sería muy complejo y, probablemente, tendría un error importante.

### 2.1.3. Ultrasonidos

T. Gudra y L. Najwer, investigadores del *Institute of Telecommunications, Teleinformatics and Acoustics*, en Wrocław, Polonia, realizaron un estudio donde se presentaban algunos métodos ultrasónicos de medición de la velocidad del sonido y su atenuación en los medios de nieve y hielo [11].

Se llama ultrasonido a las ondas mecánicas, no ionizantes, cuya frecuencia está por encima de la capacidad del oído humano. En el caso del estudio mencionado, se trabaja con frecuencias de 40 kHz.

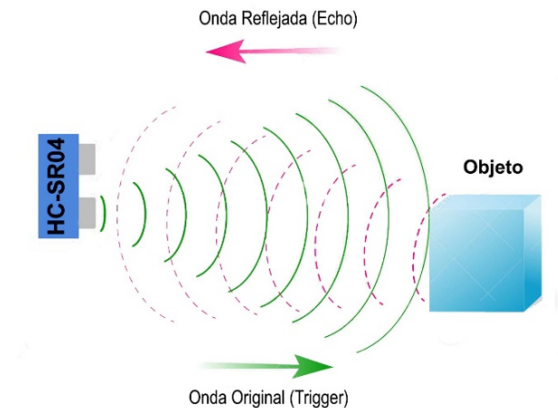
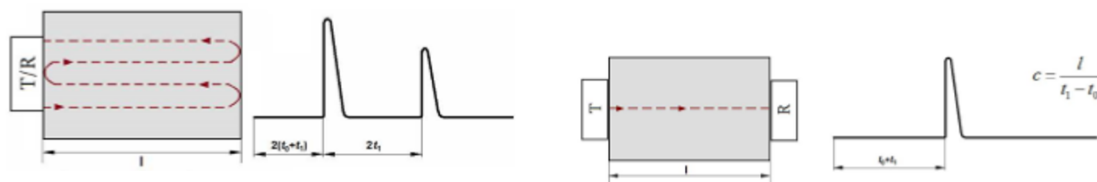


Figura 2.7: Esquemática simple del funcionamiento de un sensor de ultrasonidos.

En el caso en que el medio es nieve, se utilizó un sensor de ultrasonidos de frecuencia 40 kHz, nivel de presión generado de 120 dB y una sensibilidad de -59 dB/V/ $\mu$ bar.

Se realizó el estudio con 2 tipos de métodos. El primero utilizando un sensor de ultrasonidos con el transmisor y el receptor unidos en el mismo dispositivo, midiendo la atenuación que el medio generaba en la onda. El segundo con el transmisor y el receptor separados, donde se medía la velocidad de transmisión de la onda, y el retardo que sufría a causa del medio.



(a) Sensor ultrasónico con transmisor y receptor unidos.

(b) Sensor ultrasónico con transmisor y receptor separados.

Figura 2.8: Esquema de un pulso de ultrasonidos a través de nieve.



(a) Resultados del sensor ultrasónico con transmisor y receptor unidos.

Medium	Attenuation [dB/cm]
air	0.12
snow — $\rho = 120 \text{ kg/m}^3$	0.85
snow — $\rho = 170 \text{ kg/m}^3$	1.02
snow — $\rho = 222 \text{ kg/m}^3$	1.33

(b) Resultados del sensor ultrasónico con transmisor y receptor separados.

Snow density [kg/m <sup>3</sup> ]	Wave velocity [m/s]
120	264.4
170	258.9
222	253.7

Cuadro 2.1: Resultados del análisis del pulso de ultrasonidos a través de nieve.

Como se puede apreciar en la tabla de resultados, estos fueron muy satisfactorios, y demuestran que es posible diferenciar entre diferentes densidades de nieve mediante ondas ultrasónicas pasando a través de ella.

Este método, que se demostró que funciona con la nieve, no es igual de satisfactorio con medios sólidos como el hielo. El estudio concluye que no es un método válido para calcular la densidad del hielo.

No es la primera vez que se utiliza la tecnología de los ultrasonidos para determinar características de la nieve. El SR50 (Apéndice A.1), un sensor para medir distancias, mide el período de tiempo entre la emisión y recepción de un pulso ultrasónico que él mismo genera. Se utiliza tanto para medir el grosor como el nivel de nieve, aunque es conveniente realizar una medida de temperatura del aire para corregir la velocidad de propagación de la onda en el aire.

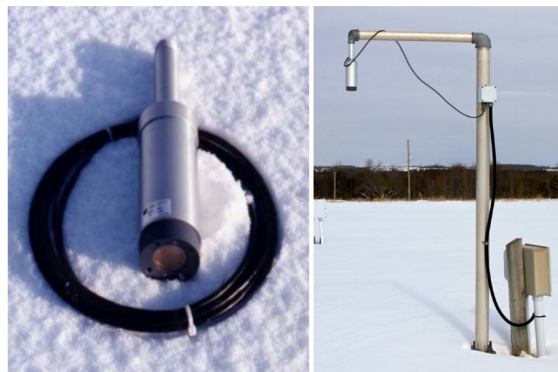
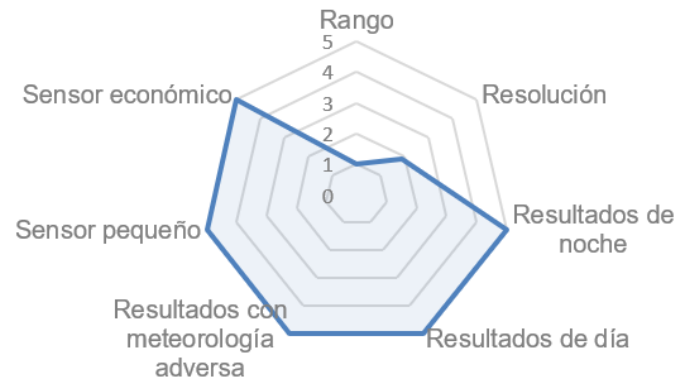
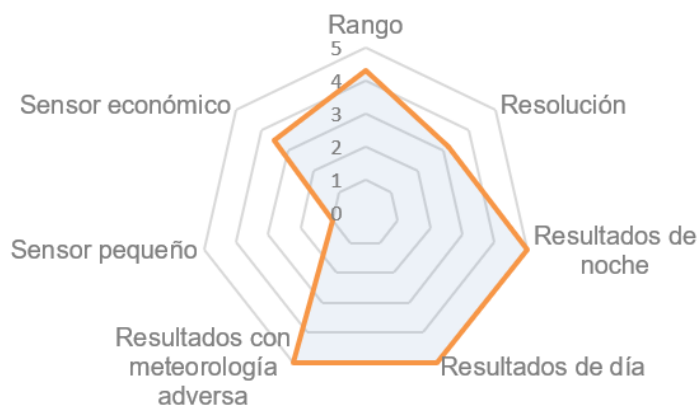


Figura 2.9: Imágenes del sensor de ultrasonidos SR50.

Una vez analizado los posibles sensores se ha hecho una comparativa entre ellos para determinar cuál, de todas las tecnologías expuestas, es la más óptima para ser utilizada en el sistema de balizamiento de este proyecto. Esta comparación se ha hecho de manera complementaria al estudio de esta sección, y en base a un estudio realizado por *Tesla* y *Google* [12]. No se incluye el sistema de matriz de electrodos por los motivos especificados en la sección 2.1.2, por lo que la comparativa es la siguiente:



(a) Comparativa de la efectividad en diferentes ámbitos para el método de ultrasonidos.



(b) Comparativa de la efectividad en diferentes ámbitos para el método de FMCW.

Figura 2.10: Comparativa entre los principales métodos de la solución tecnológica.

Teniendo en cuenta todos los puntos positivos y negativos, se ha llegado a la conclusión de que el método de los ultrasonidos es el más óptimo para nuestro proyecto. Se trata de una tecnología más económica que la del radar de onda continua, con sensores de dimensiones físicas muy pequeñas, las mediciones de los cuales no se ven influidas por la hora del día y las condiciones meteorológicas. Como contrapartidas, su rango y su resolución no son muy grandes, aún así, puesto que lo que se quiere medir son atenuaciones en la velocidad de la señal en entornos pequeños, estas carencias no nos afectan a la hora de determinar resultados.

## 2.2. Validación experimental

Una vez se ha decidido teóricamente cuál de las tecnologías de sensores es la más óptima para nuestro proyecto, procederemos a realizar una serie de pruebas experimentales para confirmar que los resultados que obtenemos son verdaderamente útiles para cumplir con los objetivos del proyecto.

El objetivo del método de ultrasonidos en nuestro proyecto no es funcional para identificar con exactitud la densidad del medio que se está analizando como en los estudios anteriormente expuestos (cuadro 2.1), sino diferenciar entre aire, nieve y hielo como posibles medios.

Para realizar el primer experimento se partió de la siguiente premisa: teniendo una distancia fija y constante, y sabiendo cuando tarda una onda ultrasónica en recorrer dicha distancia a través del aire, se realizará una medición del mismo impulso cambiando el medio en el que se propaga. En el caso de contener nieve, la onda ultrasónica deberá tardar más. En el caso de tener hielo, el cual impide la propagación de la onda, esta deberá tardar menos que propagándose a través del aire, ya que el receptor dejará de recibir señal.

Para el segundo experimento, se quiso comprobar si la humedad y espesor de la nieve podría influir en los resultados. Es decir, con nieve húmeda la onda debería ir más lenta, ya que aumentaría la densidad de la nieve, al contrario que con nieve fresca (nieve en polvo), donde la señal debería tardar menos en rebotar.

### 2.2.1. Resultados experimentales. Experimento 1

Este experimento tiene como objetivo ver si se cumple el hecho de que, con nieve como medio en lugar de aire, una onda ultrasónica tarda más en recorrer la distancia entre receptor y transmisor.

Para validarlo utilizaremos el sensor *HC-SR04* (Apéndice A.2). Este dispositivo puede conectarse a un equipo de desarrollo de microcontrolador Arduino, y consta de un emisor que lanza una ráfaga sónica de 10  $\mu$ s a 40 kHz y un receptor que es capaz de medir el tiempo que ha tardado en recibir dicha sonda.

Para este experimento además, se ha separado el emisor del receptor, para comprobar si la onda ultrasónica llega directa al receptor, sin necesidad de que haya rebote. En este caso en concreto se ha mantenido el transmisor y el receptor a una distancia fija de 12 cm, y se han realizado 3 pruebas diferentes.

- **Prueba 1:** Prueba con 4cm de nieve entre el emisor y el receptor.
- **Prueba 2:** Prueba con 7cm de nieve entre el emisor y el receptor.
- **Prueba 3:** Prueba con 10cm de nieve entre el emisor y el receptor.

Los resultados han sido los siguientes:

	Tiempo de recepción con aire (ms)	Tiempo de recepción con nieve (ms)	Incremento (ms)	Variación (ms)
Prueba 1	360-375	580-640	220-265	60
Prueba 2	360-375	866-930	510-555	64
Prueba 3	360-375	1.750-1.898	1.390-1.523	148

Cuadro 2.2: Resultados de los tiempos de recepción de la señal de ultrasonidos en las diferentes pruebas del primer experimento.



Figura 2.11: Fotografía de la distribución de sensores para el Experimento 1.

Los resultados nos muestran claramente que la hipótesis inicial es correcta: una onda ultrasónica es capaz de desplazarse a través de la nieve, y lo hace a una velocidad menor que desplazándose a través de aire. Para ver la relación entre la cantidad de nieve que hay entre el emisor y el receptor, y el tiempo que tarda la onda en desplazarse una distancia fija hemos creado un gráfico, en el cual se relaciona la cantidad de nieve entre el emisor y el receptor (eje x), con el valor medio del tiempo de recepción con nieve (eje y), es decir, con una cantidad de 4 cm de nieve, se tomará, como valor de tiempo de recepción, 610 ms, que es el valor medio entre 580 ms y 640 ms.

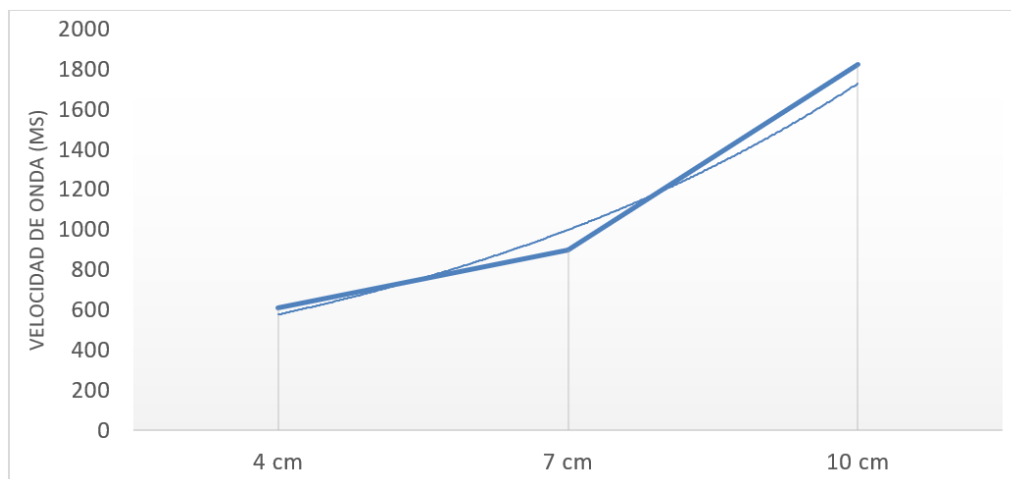


Figura 2.12: Relación entre cantidad de nieve y velocidad de señal (experimento 1).

En este caso, se observa que el tiempo de recepción de la señal tiene una tendencia exponencial creciente a medida que aumentamos la cantidad de nieve entre el emisor y el receptor. Esto se debe tener en cuenta ya que supone un aumento significativo en el error de las medidas, es decir, la variación en el tiempo de recepción con 4 cm de nieve es de 60 ms, en cambio, con 10 cm tenemos una variación de 148 ms (cuadro 2.2).

### 2.2.2. Resultados experimentales. Experimento 2

Este experimento, tiene el objetivo de probar si el tipo de nieve influiría significativamente en los resultados de retardo, es decir, si el hecho de tener nieve húmeda o nieve fresca, por ejemplo, haría variar las medidas.

Para llevar a cabo esta prueba se ha utilizado el mismo sensor que en el experimento 1, aunque esta vez el emisor y el receptor están unidos en la misma placa, de modo que la señal rebota antes de ser medida.

Para extraer una conclusión, se han realizado 3 pruebas con nieve fresca y tres pruebas con nieve húmeda. Para su realización, se ha colocado el sensor a 12 cm, a 13 cm y a 18 cm de una placa de rebote, primero con un tipo de nieve y después con la otra. No obstante, no se ha podido realizar con más de 2,5 cm de nieve entre el sensor y la placa a través de la nieve (sobre todo con nieve fresca), ya que este dejaba de dar resultados coherentes:

	Aire (ms)	Nieve (ms)	Cantidad (cm)	Incremento (ms)
Resultado 1	720-740	821-845	2,5	101-105
Resultado 2	657-670	772-780	2,5	115-110
Resultado 3	1070-1090	1190-1200	2,5	120-110

Cuadro 2.3: Resultados de velocidades de señal con nieve fresca utilizando el *HC-SR04 Arduino Ultrasonic Sensor*.

	Aire (ms)	Nieve (ms)	Cantidad (cm)	Incremento (ms)
Resultado 1	720-740	960-1017	2,5	240-277
Resultado 2	657-670	1175-1196	2,5	518-526
Resultado 3	1070-1090	1380-1420	2,5	310-330

Cuadro 2.4: Resultados de velocidades de señal con nieve húmeda utilizando el *HC-SR04 Arduino Ultrasonic Sensor*.

Como se observa en las tablas, las medidas obtenidas con nieve fresca presentan un incremento, respecto a la medida realizada solo con aire, cuando se añade la nieve entre el sensor y la placa de rebote, de entre 100 ms y 120 ms, como máximo. En el caso de la nieve húmeda, estos incrementos pasan a ser de entre 240 ms el más bajo, hasta 526 ms, lo que resultaría en un incremento 1,4 veces superior en el caso mínimo, y 3,38 veces superior en el caso máximo, respecto de la nieve fresca. Además, el rango de las medidas obtenidas con nieve húmeda, correspondientes a cada prueba, no se solapa con el rango de las medidas obtenidas con nieve fresca. Hay una distancia significativa entre el valor máximo del rango de nieve fresca y el valor mínimo del rango de nieve húmeda, por ejemplo, si nos fijamos en la prueba realizada a 18 cm, el valor de separación de rangos es de 180 ms (haciendo la diferencia entre 1.380 ms y 1.200 ms, como valores mínimos y máximos de rango, respectivamente).

Concluimos entonces que, al tener nieve a distintas densidades, la velocidad de transmisión de la onda se ve afectada, por lo que esto nos podrá servir de ayuda a la hora de realizar el pronóstico de riesgo, ya que podremos diferenciar entre las distintas densidades de la nieve.

De todas formas, la realización de estos experimentos nos ha hecho desestimar el uso del sensor *HC-SR04*. La sencillez y la poca robustez de este sensor no solo generan algunos datos erróneos, sino que impiden que tanto el transmisor como el receptor estén en contacto directo con la nieve. Además, no ofrece la potencia que se necesita para que

una onda ultrasónica se propague a través de nieve fresca (valores bajos de humedad), como se ha visto en el experimento 2 (ya que el experimento 1 también se ha realizado con nieve húmeda). Es por ello por lo que se necesitará encapsular el sensor para que quede completamente protegido de la humedad y las bajas temperaturas y aumentar su potencia para que la atenuación de la señal con el medio no impida su detección en el receptor.

## 2.3. Diseño final

Después de validar el método con los experimentos anteriores (secciones 2.2.1 y 2.2.2) se ha llegado a la conclusión de que el sistema de sensores ultrasónicos es un método válido, experimentalmente, para determinar el tipo de medio y su espesor. Así pues, estos sensores se distribuirán, enfocados verticalmente, a lo largo de la baliza, y nos permitirán determinar el tipo de medio entre un sensor y el siguiente, ya que la separación entre estos será de unos pocos centímetros.

La distancia entre sensores dependerá del tipo de sensor y su potencia, aunque podría ser una cifra de unos 20 cm, ya que es la que se aplica con el método actual utilizado para extraer un perfil estratigráfico, debido a que, con estas profundidades, el gradiente de nieve es suficientemente notable. No obstante, este valor puede ser modificado en función de las características de una zona, que podría necesitar un control estratigráfico más exhaustivo.

Una opción de sensor para usar en el método final sería el *MB1040 LV-MaxSonar-EZ4* (Apéndice A.3), ya que es un sensor con más potencia que el sensor utilizado en los experimentos anteriores (requisito comentado en la conclusión final de los resultados experimentales), y con mayor directividad. Aun así, teniendo en cuenta sus especificaciones, ya que deberá estar interconectado, este sensor no se ha podido obtener físicamente durante la realización del proyecto.



Figura 2.13: Sensor *MB1040 LV-MaxSonar-EZ4*.

Aun así, teniendo en cuenta sus especificaciones, ya que deberá estar interconectado con todos los dispositivos del sistema de balizamiento, en la sección 3.2, en la que se detalla la integración (alimentación, consumo eléctrico, etc.), se podrá añadir la conclusión sobre la posible incorporación de este sensor en el sistema.

## CAPÍTULO 3. DESARROLLO TÉCNICO

En este proyecto se propone un desarrollo técnico, en el cual los drones monitorizarán el área de análisis en tiempo real, y se comunicarán con los sensores sujetos a las balizas, recogiendo los datos necesarios para el pronóstico del estado del manto nivoso como sería la temperatura en los distintos estratos y la profundidad que ocupan. La obtención de estos datos se hará posible gracias al sistema de comunicación que se va a implementar, el cual permite una comunicación inalámbrica, el uso de sensores de bajo consumo, etc. junto con los drones, que realizan la monitorización de la zona de riesgo garantizando el control continuo, y recibiendo información útil para el diagnóstico del estado de la zona. Para llevar a cabo el sistema de comunicación entre las balizas y el dron, se ha seguido una parte del planteamiento del proyecto 'Ixorigué' [13] propuesto por la empresa HEMAV S.L., en el cual se realizaron pruebas para comprobar el correcto funcionamiento del sistema y su duración y la obtención de datos desde el *dispositivo\_baliza* hasta el dron.

### 3.1. Obtención de datos

Los datos se reciben a través de la comunicación entre las balizas y el vehículo no tripulado y se almacenan durante el vuelo en la tarjeta SD de memoria incorporada en el dron. Los datos se transfieren a los usuarios en formato de fichero de texto (.txt) para que a continuación se puedan procesar para el control de la situación de la zona de aplicación. Finalmente, cualquier usuario podrá visualizar, a través de un visor, los resultados derivados del análisis de los datos.



Figura 3.1: Esquema del proceso de obtención de datos entre dispositivos.

El dron deberá estar equipado con un *dispositivo\_dron* capaz de recibir la información recogida por los sensores y almacenada en un segundo *dispositivo\_baliza* acoplado a cada una de las sondas.

Desde un punto de vista técnico, la mínima cantidad de información que deberían almacenar los *dispositivos\_baliza* sería:

1. **Número de identificación** de la baliza.

2. **Temperatura** del estrato donde se encuentra cada sensor.
3. **Profundidad** de cada estrato y del total del manto.
4. **Velocidad de señal** a través del medio de cada estrato.

La obtención de esta información se hará a través de diferentes sensores o dispositivos, que nos proporcionarán cada uno de los parámetros (excepto el número de baliza, que se puede introducir en el fichero de texto final sin necesidad de ningún sensor):

- **Temperatura:** Para obtener los valores de temperatura se utilizará el sensor *DS18B20* de la casa Maxim Integrated, el cual tiene un rango de operación de temperatura de  $-55^{\circ}\text{C}$  hasta  $125^{\circ}\text{C}$ , una precisión de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  y un rango de alimentación es de 3V hasta 5,5V (Apéndice A.5) Es un sensor económico, que puede ser utilizado en zonas húmedas y en medios fríos, y capaz de aportarnos datos suficientes. Su salida digital permite conectarlo directamente a un microcontrolador.
- **Velocidad de onda:** Para este parámetro, se utilizarán los sensores de ultrasonidos, detallados en la sección 2.1.3. Como se ha comentado, se podría utilizar el sensor *MB1040*, ya que, si cumple con los requisitos para su integración en el sistema, tiene las prestaciones necesarias para la obtención de la velocidad de la onda, que puede ser interpretada como un parámetro de densidad, a través de la transformación del retardo de la señal de onda. Aun así, para el desarrollo experimental y teórico de este proyecto se ha utilizado el sensor *HC-SR04*, y el sensor *JSN-SR04T-2.0* (Apéndice A.4), porque es un sensor encapsulado, aunque no cumple con la potencia necesaria, pero su consumo puede ser comparable con el del sensor *MB1040*. De todas formas, para implementar el sensor *MB1040*, no se deberían añadir cambios al circuito, ya que su formato de salida de interfaz incluye una salida PWM y una salida en serie, así como el sensor *JSN-SR04T-2.0*.
- **Profundidad:** Para el cálculo de la profundidad y el espesor del volumen del manto nivoso, se aprovechará la instalación de los sensores de ultrasonidos utilizados para las mediciones de velocidad. Se utilizarán las medidas de velocidad de transmisión de la onda, para determinar cuál es la última capa del manto, y su dimensión (centímetros que faltan hasta el siguiente sensor). Además, para tener referencias sobre la profundidad del manto, las balizas tienen distintos colores en función de su propia altura. Este detalle nos servirá más adelante también, cuando hablemos de la operativa de la plataforma utilizada en el apartado de desarrollo operacional, ya que los distintos colores de las balizas pueden ayudar en el procesado de las imágenes obtenidas con el dron.

## 3.2. Sistema de balizamiento y plataforma

La solución técnica adoptada, consistente en la distribución de las balizas sobre el terreno, encargadas de la obtención de los datos de estado del manto, junto con el dron encargado de almacenar la información para su posterior análisis, se compone por los comentados *dispositivo\_baliza* y *dispositivo\_dron*. El diagrama del formato de sistema es el siguiente:



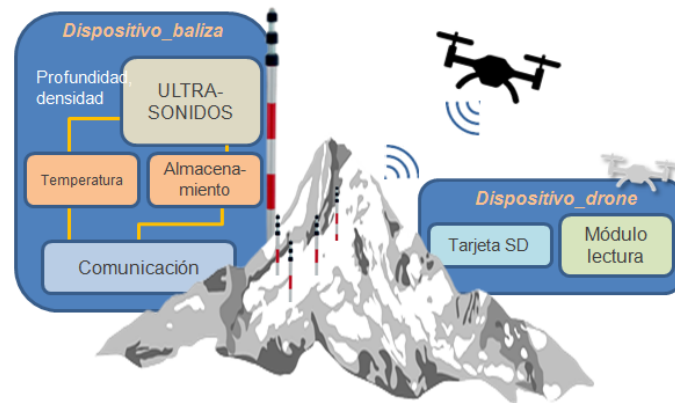


Figura 3.2: Diagrama de funcionamiento del formato del sistema de balizamiento y plataforma.

Como vemos, existe una comunicación entre el módulo de parámetros y el módulo lectura (que se explicarán a continuación), y a través del *dispositivo\_dron*, se pueden obtener los datos almacenados en la tarjeta SD de la que dispone. Cada uno de los dispositivos puede especificarse de la siguiente forma:

### Dispositivo baliza

El dispositivo encargado de la obtención de los datos del estado de los estratos del manto nivoso. Se compone por el siguiente módulo:

- Módulo parámetros: Este módulo se instala en la baliza para realizar la lectura de los parámetros de temperatura, densidad y profundidad y enviar estos datos al *dispositivo\_dron*. Este módulo está equipado con los sensores de temperatura *DS18B20* y con los sensores de ultrasonidos para la lectura de la profundidad y velocidad de la onda a través del medio.

Además, también está equipado con una placa LoPy (de Pycom) que recibe la señal de los sensores y realiza el envío de datos al *dispositivo\_dron* mediante radiofrecuencia, como tecnología de comunicación, y con modulación LoRa a 868 MHz (según la banda libre europea). Las placas LoPy garantizan un consumo menor que con otros modelos (por ejemplo Arduino), y nos ofrecen la posibilidad de utilizar la modulación LoRa. (Apéndice A.6)

La modulación LoRa nos ofrece prestaciones como un menor consumo que con una comunicación de radiofrecuencia convencional de 433 MHz, poca interferencia, disponibilidad de transmisión desde hasta 100 nodos al mismo tiempo y la posibilidad de un algoritmo anti-colisiones funcional cuando se transmite desde varios nodos a la vez. Por ejemplo, si tenemos diversas balizas en una zona y estas pueden enviar los datos al mismo tiempo, el dron recibirá todos los paquetes con mayor probabilidad y detectará los problemas de transmisión más rápido, en comparación de si el dron tuviera que ir recogiendo todas las muestras por separado.

Se incluye también una placa PyTrack, que es un módulo de expansión para la placa LoPy, que incorpora un lector de tarjetas microSD, para poder almacenar grandes

cantidades de datos.

### Dispositivo dron

El dispositivo encargado del almacenamiento de los datos obtenidos a través del sistema de balizamiento. Se compone por un módulo de lectura y por la plataforma:

- **Módulo lectura:** Este módulo se instala en el dron para la lectura de los datos enviados por el módulo parámetros, y poder guardarlos en una tarjeta SD. Para ello se utiliza una placa LoPy junto con el módulo de expansión que garantiza mayor capacidad para el almacenamiento de información.
- **Plataforma:** Para llevar a cabo los vuelos para la obtención de datos se necesita un dron fácil de usar, fiable, de dimensiones reducidas y cómodo de transportar, ya que deberá trasladarse hasta las zonas de interés de alta montaña. Este vehículo debería permitir una distancia de transmisión con su estación de control de varios kilómetros, para enviarlo a lugares lejanos para la obtención de datos, ya que se necesita un vuelo cercano al *dispositivo\_baliza* porque el módulo parámetros solo tiene 1 km de rango máximo para la transmisión (debido a las placas LoPy) y, además, el vuelo estacionario, para la recogida de los datos. A partir de estas condiciones, se elige el quadrotor<sup>1</sup> Mavic Pro Platinum de DJI (Apéndice A.7), el cual alcanza un rango de operación de 4 km (CE<sup>2</sup>), es decir, una potencia de 20 dBm, una autonomía de unos 30 minutos (en condiciones ambientales normales) y la carga de sus baterías puede efectuarse en poco tiempo. Como alternativa a este dispositivo, se podría utilizar el dron Phantom 4 Pro (Apéndice A.8), el cual tiene un rango de operación (CE) de 3,5 km (17 dBm) y la misma autonomía. No obstante, deben estudiarse las características del *dispositivo\_dron* cuando se plantee la aplicación del sistema de control y prevención de aludes, para que se adapte a las condiciones óptimas de las distintas zonas que se vayan a analizar. Por ejemplo, la autonomía del mismo cuando la temperatura de la zona de actuación sea inferior a los 0°C (ver sección 4.4) o la interferencia que se podría generar debido a la orografía de la zona.

Después de la incorporación de los dispositivos para la correcta obtención de datos, se debe tener en cuenta la duración y el mantenimiento de todo el sistema, ya que se compone de diversos dispositivos y sensores con características variables y se requiere que el sistema funcione durante un largo periodo, como sería el periodo invernal. Para ello, se ha calculado el consumo total del sistema, que incluiría la placa LoPy del módulo de parámetros (alimentada por la placa de extensión), los sensores y la comunicación:

<sup>1</sup>Un quadrotor o quadrirotor es una aeronave con cuatro rotores para su sustentación y propulsión.

<sup>2</sup>CE es equivalente a la cantidad de potencia de transmisión permitida en Europa, para la regulación de comunicación radio. En Estados Unidos existe la FCC (Comisión Federal de comunicación), que permite un rango de hasta 7 km (26 dBm) con el Mavic Pro Platinum.

Dispositivo	Estado	Alimentación	Consumo	Modelo	Periodo de actividad	Unidades por baliza
Placa de desarrollo	Activo	3,3 V a 5,5 V	50 mA	LoPy 1.0	10 min/día	1
	Comunicación LoRa		15 mA			
	Standby		10 µA		23.83 h/día	
Sensor ultrasónico	Activo	5,0 V	30 mA	JSN-SR04T-2.0*	20 s/día	9**
Sensor temperatura	Activo	3,0 V a 5,5 V	1 mA	DS18B20		9***
	Todos los componentes del sistema de alimentan dentro de un mismo rango. La comunicación entre los dispositivos (baliza-dron) se realizará 2 veces al día. Esto supone una duración de 10 segundos para cada obtención de parámetros y 5 minutos de transmisión para cada envío de datos. El consumo de la placa de extensión se incluye en el consumo total de la placa de desarrollo.					

Tabla 3.2.1. Parámetros para el cálculo de consumo del sistema

(\*)El sensor *MB1040 LV-MaxSonar-EZ4* presentado en la sección 2.1.5 sería apto para el diseño del circuito del sistema de balizamiento, ya que se alimenta de 2,5 V a 5,5 V.

(\*\*)La placa LoPy dispone de 19 puertos libres para conectar los sensores. Cada sensor necesita un puerto de entrada y uno de salida, por eso el máximo de conexiones es 9.

(\*\*\*)Si en uno de los puertos conectamos un multiplexor, podremos incrementar el número de sensores conectados al sistema.

Cuadro 3.1: Parámetros para el cálculo de consumo del sistema.

En el cuadro 3.1, se muestran las características de los componentes incorporados en una baliza. Para el cálculo del consumo eléctrico total:

$$\begin{aligned}
 \text{CE(mAh/día)} &= [(50\text{mA} + 15\text{mA}) \cdot 1 \cdot 0,167\text{h}] + [10^{-2}\text{mA} \cdot 1 \cdot 23,83\text{h}] \\
 &+ [(((30\text{mA} + 1\text{mA}) \cdot 9) + 50\text{mA} + 15\text{mA}) \cdot 0,0056\text{h}] = \mathbf{13,02 \text{ mAh/día}}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Si tenemos en cuenta la posible degradación que sufre la batería que alimenta el sistema, la cual estimamos que será del 20 %, nos quedará un consumo eléctrico total diario:

$$\text{CEt(mAh/día)} = \frac{CE}{0,8} = \frac{13,02}{0,8} = \mathbf{16,28 \text{ mAh/día}}
 \tag{3.2}$$

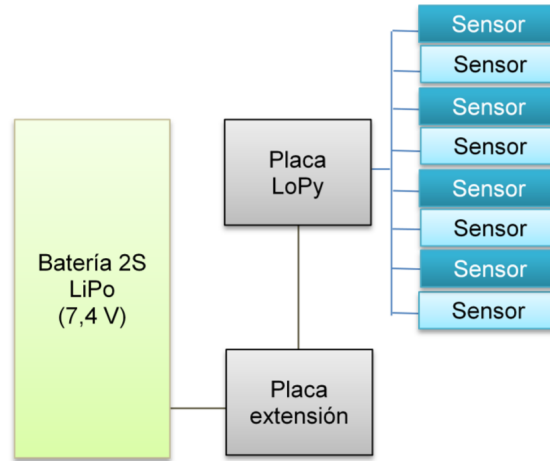
Una vez tenemos el consumo, podremos calcular la capacidad que debería tener la batería de alimentación si se requiere que el sistema sea de larga duración, para mantener el sistema activo durante el periodo invernal (4 meses que equivaldrían a unos 120 días):

$$\text{C(mAh)} = 16,28 \frac{\text{mAh}}{\text{día}} \cdot 120\text{días} = \mathbf{1.953 \text{ mAh}}
 \tag{3.3}$$

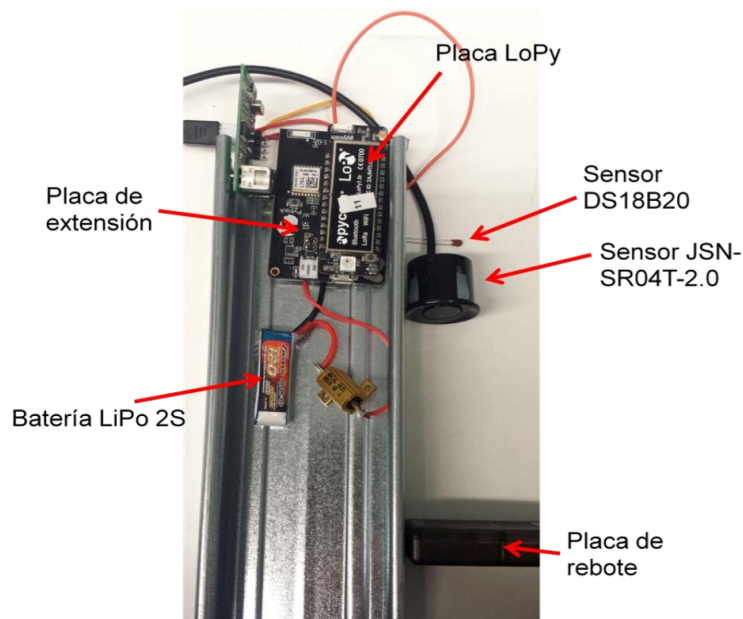
Este resultado indica que necesitaremos una batería que tenga una capacidad igual o superior a 1.953 mAh, para mantener activo el sistema durante el periodo deseado. Para ello hemos elegido una batería *LiPo 2S*, con una capacidad media de 2.200 mAh (pudiendo

llegar a 3.000 mAh), ya que hay que intentar que no quede descargada por completo, por motivos de mantenimiento y vida útil (SoH<sup>3</sup> de la batería).

A continuación, se procede a detallar la mecánica del sistema en conjunto y la interconexión de los distintos dispositivos a través de las figuras 3.3.a y 3.3.b:



(a) Esquema gráfico de la interconexión entre los distintos dispositivos del sistema de balizamiento y plataforma.



(b) Interconexión de los distintos dispositivos que forman el sistema de balizamiento y plataforma (reproducción adaptada del circuito). *Las balizas serían de plástico, no de metal como se observa en la figura.*

Figura 3.3: Interconexión de los distintos dispositivos del sistema de balizamiento y plataforma.

Como se ve en la figura 3.3.b, dentro de cada baliza se incorporará la placa LoPy junto

<sup>3</sup>El SoH (State of Health) es una figura que valora el estado de una batería (o una célula, o un paquete de baterías), comparándola con sus condiciones ideales. Las unidades de SoH son puntos porcentuales.

con su placa de extensión (que se conecta directamente a la batería y alimenta a la placa LoPy), con la que se interconectan los sensores de ultrasonidos y los de temperatura. Estos sensores se distribuyen a lo largo de la baliza, orientados verticalmente, así como las placas de rebote, que sirven principalmente para ofrecer una superficie donde la onda ultrasónica pueda rebotar (en caso que el sensor ultrasónico sea de rebote, como es habitual). En caso que este sensor fuera de transmisión directa (emisor separado del receptor), la placa no sería necesaria.

El sistema se alimentará a través de una batería, la cual estaría situada en la parte inferior de la baliza debido a que, al estar expuesta a temperaturas muy bajas (inferiores a los 0°C), la vida de la batería puede verse reducida o tener un menor rendimiento. De esta forma, una buena opción para la ubicación de la batería de alimentación del sistema podría ser bajo tierra, en la parte de la baliza que estaría enterrada bajo la superficie. Para la fijación en el suelo de las balizas, su diseño dispone de un acabado de punta de rosca, para facilitar la perforación del suelo al colocarla (figura 3.4) y, si fuera necesario, se pondrían unos tensores o una rótula en la inserción de la sonda en el suelo, para una sujeción más robusta.



Figura 3.4: Reproducción a escala de un prototipo de baliza simple.

Finalmente, toda la información recopilada durante el periodo de actividad del sistema, irá anexada con la información meteorológica necesaria para dar el pronóstico exhaustivo de la zona analizada. Resulta necesario entonces, conocer la situación meteorológica desde un mínimo de los 7 días anteriores, pudiendo aumentar la cifra temporal, si fuera necesario, y hacer la correlación de esta información con los datos obtenidos sobre el estado del manto para dar el pronóstico adecuado. De esta manera, podemos establecer las características de la zona entorno a estimaciones que dependen en mayor parte de la metamorfosis de la nieve [14]. Esto significa que, a partir de los cambios que sufre la nieve en función de las condiciones ambientales, su disposición sobre el suelo y los datos extraídos de cada estrato, se puede desarrollar una estimación del estado del manto, como se comentaba en la sección 1.3. Por lo tanto, en función de los estudios teóricos realizados por nuestro equipo, se pueden dar unas pautas que justifiquen la interpretación

de los resultados obtenidos en cada caso (ver tablas del anexo).

### 3.3. Operativa

Para proceder a la obtención de datos se deberá proponer la distribución de las balizas, en función de las características del terreno a analizar. Es decir, las balizas deben estar situadas en las zonas del terreno que verdaderamente puedan sufrir algún tipo de deslizamiento, ya sea por su inclinación o su orientación. Las principales pautas a seguir en cuanto a la operativa aplicable para el estudio de la distribución son las siguientes [15]:

- Orografía: se refiere tanto a las elevaciones que puedan existir en una zona en particular (región, país, etc.) como a la descripción de las mismas que realiza la geomorfología. Dentro de la orografía de montaña podemos clasificar entre canales, barrancos, bosque, inclinación, neveros (nieve perpetua), etc.
- Orientación: de la propia montaña, es decir, si se orienta hacia el norte o hacia el sur. Con la orientación de las caras de la montaña podemos extraer diversas conclusiones ya que, por ejemplo, en invierno el sol es más bajo y el sol no llega al zenit (movimiento transversal), con lo que en las caras orientadas hacia el sur-oeste el sol actúa por la tarde pero sin calentar demasiado estas regiones, pero en las caras sur-este existe más riesgo por el calor. Esto puede observarse, por ejemplo, en la región de Bonaigua, donde la nieve no se retiene durante tanto tiempo ya que es la parte situada más al este de la región de Baqueira.

Siguiendo las pautas descritas para el estudio de la distribución del sistema de balizamiento, y a través de información referenciada, podemos concretar las zonas que, con mayor probabilidad, son propensas a sufrir riesgos por aludes:

- Cara norte: Las caras de la montaña orientadas hacia el norte suelen tener altos grados de inclinación y fuertes pendientes. En estas caras, no crece mucha vegetación, ya que no están altamente afectadas por el sol. En las regiones norte es donde se producen más aludes, sobre todo cuando hay nieve fresca y hielo (aludes de placa).
- Cara sur: Las caras de la montaña orientadas hacia el sur, suelen tener menos inclinación y es donde más abunda la vegetación. En estas zonas, cuando hay episodios de nieve primavera (nieve húmeda), esta suele acumularse con mayor facilidad debido a la poca inclinación, y en consecuencia, se producen grandes desplazamientos de nieve.

A continuación, mostramos un ejemplo de la distribución del sistema de balizamiento, en el mapa de la región de Baqueira-Beret, donde se han señalado las zonas donde es necesaria la ubicación de balizas y la extracción de información:





Figura 3.5: Mapa de la región de baqueira-beret para el estudio de la distribución del sistema de balizamiento.

Si observamos la región de Beret, concretamente en la zona de Blanhiblar (Tuc de Costarjás), vemos que está orientada hacia el sur, con lo que no es una zona muy inclinada y sufre mucha acumulación de nieve. Además, esta zona tiene palas de grandes dimensiones, con lo que hay mayor probabilidad que se produzcan desprendimientos a lo largo de su extensión. En esta región, la distribución propuesta sería la siguiente:

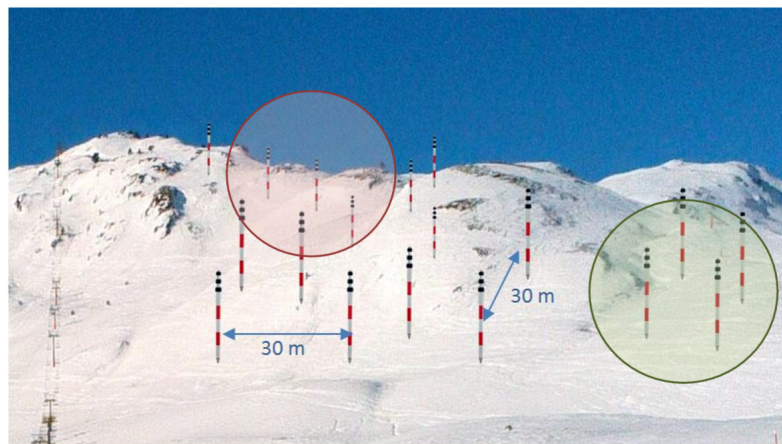


Figura 3.6: Propuesta de distribución de balizas en la zona de Blanhiblar.

Las sondas estarían espaciadas 30 m entre ellas (ya que no son palas de gran extensión), y se repartirían de acuerdo con las inclinaciones de la región, es decir, aquellas zonas cuya inclinación sea la misma o similar se contabilizarán como un solo sector. Como se observa en la parte superior de la imagen (círculo rojo), si existen inclinaciones muy distintas, se deberán tratar por separado, distribuyendo balizas en dichas zonas sin tener en cuenta las balizas más cercanas, ya que podrían no estar bajo las mismas condiciones orográficas. De la misma forma, vemos también que las balizas situadas a la derecha de la imagen (círculo verde), siguen una distribución independiente al tratarse de otra placa de distintas características, como su inclinación.

Si nos fijamos en la zona de Montgarri (Tuc deth Dossau), nos situaríamos en una zona orientada hacia el norte, por lo tanto, con grandes desniveles. En esta zona, como se observa en el mapa (figura 3.5), hay una región cubierta de vegetación. Los árboles dan cohesión a las capas de nieve, limitando el volumen de estas e impidiendo su rotura. Por esta razón, debemos hacer una división de la montaña, en la cual solo la parte libre de vegetación deberá estar dotada de balizas. Esta situación, también ocurre en la región de Saumet (Tuc de Baciver), en la que la vegetación se encuentra en la cara sud-este de la montaña y, la cara noroeste, sufre de grandes desniveles y tiene varias palas.

El espaciado entre balizas puede variar, en función de las placas, las inclinaciones, el tamaño de la zona, etc. Por ejemplo, si hay una placa de grande extensión, el espaciado puede ser de 50 m entre las balizas. Por otro lado, si nos encontramos una zona reducida cuya inclinación supere los  $35^{\circ}$ , el espaciado podría llegar a ser de 5 m entre cada una de las sondas.



## **CAPÍTULO 4. DESARROLLO OPERACIONAL**

Como se ha comentado anteriormente, en este proyecto se utilizará la fotogrametría, en este caso apoyada en la teledetección, para realizar un escaneo del terreno. Esto se efectuará con el objetivo de mantener un control de la evolución del nivel de nieve en una zona amplia, para así poder prever de manera más exacta cuando y donde se puede desencadenar un alud. Esta función se realizará con un dron equipado con un dispositivo que permitirá conocer con exactitud la altitud del terreno.

### **4.1. Metodología**

Para conocer la altitud de todos los puntos del terreno, existen dos tipos principales de metodologías compatibles con la tecnología dron. Mediante la aplicación de un sensor LIDAR o mediante un procedimiento de aerotriangulación.

#### **4.1.1. LIDAR**

Un método funcional para conocer cómo evoluciona el volumen de la nieve, controlando de manera regular cómo varía la profundidad del manto nivoso, es mediante un proceso de fotogrametría con un sensor LIDAR.

El sensor LIDAR se basa en la tecnología óptica de teledetección, que mide distancias desde un punto emisor a cualquier superficie mediante un láser pulsado. De este modo, sobrevolando una zona con un dron equipado con un LIDAR, se puede determinar la altitud del terreno con gran exactitud, generando una nube de puntos a diferentes coordenadas tridimensionales (figura 4.1).

Si este terreno se llena de nieve, su altitud aumentará, por lo que se necesitará realizar varios vuelos de forma regular en el tiempo para ver cómo varían estas alturas y, por lo tanto, el volumen del terreno.

Se trata de un método altamente preciso, pero con un coste muy elevado. Actualmente, el hecho de equipar un sensor LIDAR en un dron es caro, y si no es indispensable se acostumbra a buscar sustitutos que, si bien no aportan el mismo grado de precisión, compensan en lo que respecta al coste. Por otro lado, estamos hablando de una tecnología que nunca se ha utilizado en entornos de nieve, por lo que no se ha podido testear con eficacia para determinar si este método tendría un error significativo en las medidas.

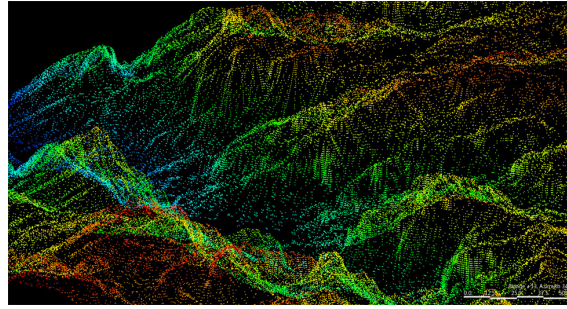


Figura 4.1: Nube de puntos con diferentes alturas obtenida mediante un sensor LIDAR.

#### 4.1.2. Aerotriangulación

La aerotriangulación es un proceso que permite determinar coordenadas terrestres con poca información de campo, aprovechando las relaciones geométricas entre fotografías consecutivas. Así mismo, también sirve para realizar mediciones de ángulos y/o distancias en fotografías traslapadas mediante una solución espacial que usa los principios perspectivos.



Figura 4.2: Ejemplo de aerotriangulación: generación de coordenadas terrestres con gran precisión mediante la superposición de imágenes tomadas de forma perpendicular.

En el caso de este proyecto se ha determinado que la aerotriangulación es el método más óptimo para realizar procesos de fotogrametría aérea. Se trata de un sistema mucho más económico que el de la tecnología LIDAR, y puede llegar a darnos resoluciones del mismo orden de magnitud.

Esto se ha probado mediante una prueba con HEMAV S.L. en la que se ha sobrevolado la pista de Ampriu de la estación de esquí de Aramón-Cerler, ubicada en el pirineo aragonés, realizando la fotogrametría de la zona. A través del procesado y la superposición de las imágenes tomadas, se han obtenido los distintos planos del resultado final. Estos planos se definen como el ortomosaico, el plano de las curvas de nivel y el modelo digital del terreno:

- **Ortomosaico:** Es la composición de imágenes a las que se les han corregido todos los errores geométricos para que cada punto en el terreno sea observado desde una perspectiva perpendicular. Este entregable nos permite realizar mediciones y controlar la evolución del terreno de manera sumamente precisa.



Figura 4.3: Ortomosaico.

- **Plano de las curvas de nivel:** Representa la serie de líneas que unen los puntos que tienen la misma altitud. Este entregable resulta muy útil para conocer la altitud de la superficie con exactitud, pero no con la máxima precisión deseada.

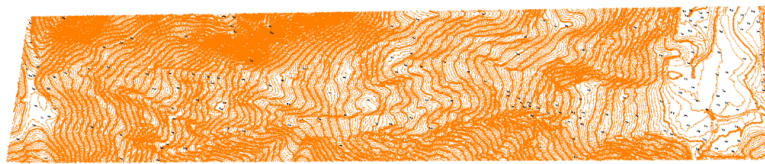


Figura 4.4: Plano de las curvas de nivel.

- **Modelo Digital del Terreno:** Finalmente, el modelo digital se genera mediante una nube de puntos, creada a partir de las fotos perpendiculares al terreno. Se triangula cada 3 puntos para crear una malla en 3 dimensiones que une todos los puntos y crea un modelo digital del terreno fotografiado.

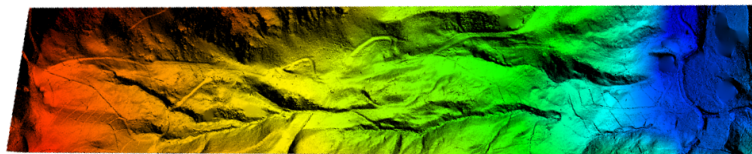


Figura 4.5: Modelo Digital del Terreno.

Con un Modelo Digital del Terreno (MDT) podemos definir una cota de elevación para cualquier punto que queramos establecer. Repitiendo la misma acción con el terreno nevado tendremos un modelo digital de la nieve y seremos capaces de medir la cota de elevación del mismo punto y ver hasta qué punto ha aumentado. Si el vuelo y el procedimiento se realizan de manera regular se puede obtener una evolución clara del volumen del manto nivoso de toda la zona analizada.

## 4.2. Operativa del proyecto

Se ha visto que el proceso de aerotriangulación puede ayudarnos en gran medida a controlar el volumen de nieve de zonas extensas para ayudar a prever aludes espontáneos.

Aun así, este método, aplicado a nuestro proyecto, presenta una serie de problemas. Para empezar, necesitaremos que el Modelo Digital del Terreno presente una resolución homogénea de las imágenes obtenidas, ya que, al trabajar con superficies nevadas, las cuales presentan una disposición sobre el suelo bastante uniforme y un color similar, un cambio significativo en dicha resolución dentro de una misma operación podría afectar en la correcta generación del modelo digital. Además, por el hecho de tratar con nieve, un cambio de algunos centímetros en la altitud puede suponer una gran diferencia en la estimación del riesgo. En desniveles extremos, por ejemplo, la precisión se ve influenciada en gran medida por la resolución, ya que esta última define el límite de la primera.

Esto pasa porque actualmente, la gran mayoría de vuelos realizados para efectuar un análisis de tipo geomático o de análisis del terreno, se efectúan mediante pasadas rectilíneas realizadas a altura constante, o con una variación de pendiente constante (figura 4.6). Esto se debe a que las zonas analizadas por drones acostumbran a ser zonas con desniveles poco pronunciados y constantes, por lo que la diferencia de resolución en las imágenes obtenidas con aerotriangulación en vuelos rectilíneos es despreciable.

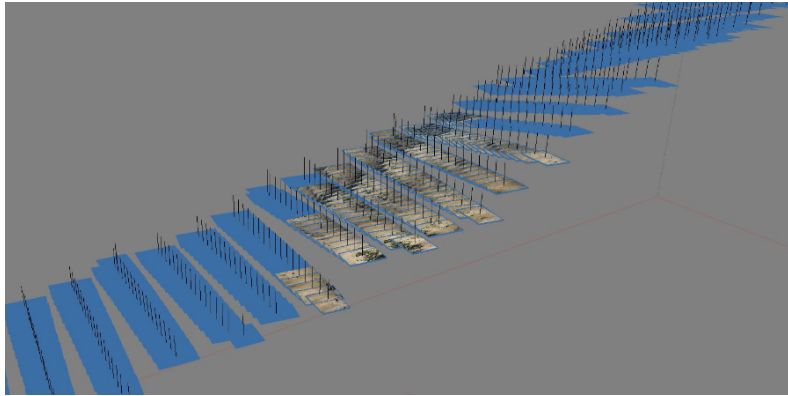


Figura 4.6: Plan de vuelo de 28 pasadas a altura constante para la aerotriangulación de la estación de esquí de Aramón-Cerler.

En la figura 4.6 se representan las pasadas realizadas en Cerler a través de un plan de vuelo a altura constante. Entendemos por plan de vuelo, el conjunto de *waypoints* que forman la trayectoria que recorre una aeronave, que en nuestro proyecto se tratará de un vehículo aéreo no tripulado. Para este proyecto, estas trayectorias serán muy significativas, ya que concluirán con la operación que más se ajuste a los requisitos como, por ejemplo, la resolución que se comentaba anteriormente.

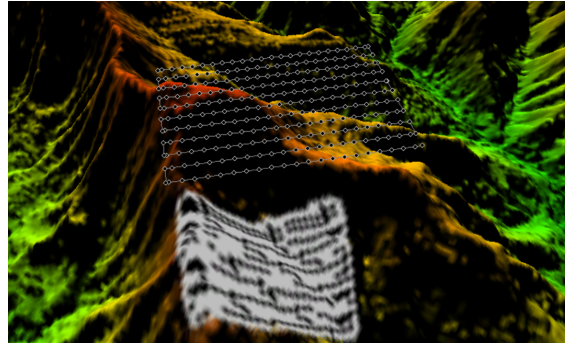
La operativa de este proyecto se desarrollará en zonas montañosas con una orografía extrema, y debido a esto, la falta de homogeneidad en la resolución de todas las imágenes generadas por vuelo rectilíneo puede llegar a ser considerable.

Esto se puede comprobar a través de la siguiente fórmula para calcular la escala que tendrá la imagen que se genere mediante fotogrametría [16]:

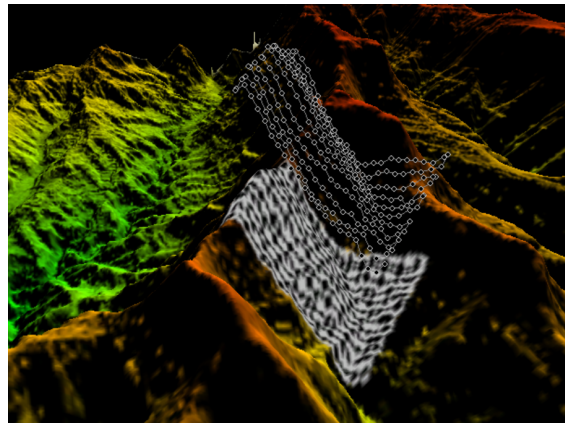
$$1 : Escala = \frac{Distancia\ focal\ de\ la\ cámara}{Altura\ de\ vuelo\ sobre\ el\ terreno} \quad (4.1)$$

En el caso del vuelo en Cerler (sección 4.1.2), este se ha realizado con una cámara con

una distancia focal de 50 mm, por lo que, volando a una altitud de 100 metros sobre el nivel del terreno, se genera una imagen con una escala de 1:2.000. Esto nos indica que 1 centímetro en la foto equivale a 20 metros en la realidad. Por lo tanto, si, volando en estas condiciones, nos encontramos con un desnivel de 100 metros, el dron pasará a volar a una altitud de 200 metros sobre el nivel del terreno, y esto generará imágenes con una escala de 1:4.000, por lo que 1 centímetro en la foto pasará a equivaler 40 metros en la realidad.



(a) Ejemplo de un vuelo a altitud constante.



(b) Ejemplo de un vuelo con altitud variable.

Figura 4.7: Ejemplo de un vuelo con altitud constante y uno con altitud variable.

Podemos relacionar la escala de una imagen con su resolución mediante la siguiente formula, en que se relacionan el tamaño de píxel del sensor, valor fijado por la cámara, con el tamaño de píxel en la foto, la distancia real del terreno que ocupará un píxel de la imagen [16]:

$$\frac{\text{Distancia focal de la cámara}}{\text{Altura de vuelo sobre el terreno}} = \frac{\text{Tamaño de píxel del sensor}}{\text{Tamaño de píxel en la foto}} \quad (4.2)$$

Con esta igualdad, y teniendo en cuenta que, la distancia focal de la cámara y el tamaño de píxel del sensor son valores fijos dados por la cámara embarcada en el dron, se puede llegar a la conclusión de que la variación de resolución es inversamente proporcional a la altura sobre el terreno en la que se toma una fotografía. Es decir, si la altura aumenta el doble, la resolución disminuye hasta la mitad.

Vemos, por consiguiente, que teniendo un vuelo en una zona con desniveles de 100 metros, la resolución puede llegar a variar hasta un 100 % (la escala pasa de 1:2.000 a 1:4.000). Esta falta de homogeneidad en la resolución en una misma operación es la que se puede traducir en errores de procesamiento e impedir la correcta generación del Modelo Digital del Terreno.

Se necesitará, por lo tanto, un método específico para la generación de la ruta que seguirá de manera automática el dron, que permita planificar un plan de vuelo cuya altitud sea variable y se adapte a la orografía del terreno. De esta forma, si nos encontramos, por ejemplo, con una depresión repentina, el dron deberá ser capaz, siguiendo su plan de vuelo, de bajar su altitud para seguir analizando el terreno. Esto conllevará un análisis de todos los puntos del terreno a una misma distancia, y disminuirá en gran medida la variación de la resolución o la pérdida de información.

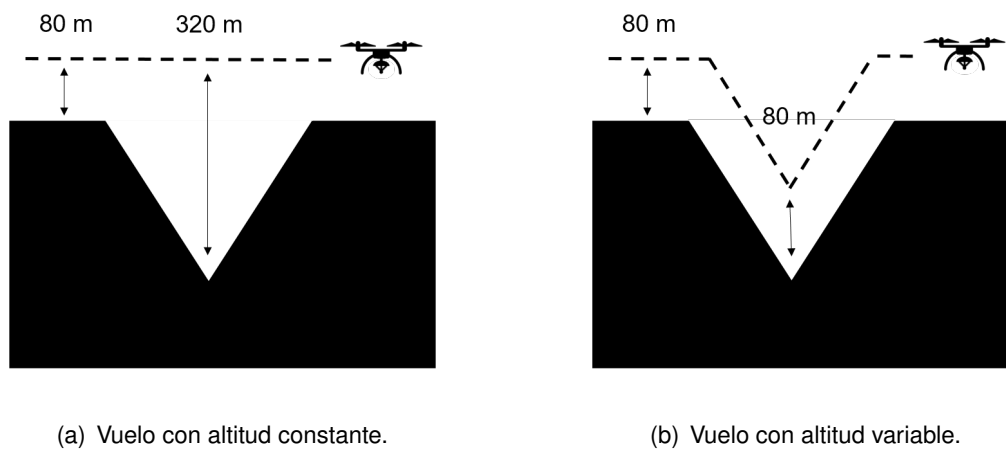


Figura 4.8: Diferencia entre vuelo con altitud constante y con altitud variable. Este último permite una toma de datos en las mismas condiciones a todos los puntos, reduciendo la variación de resolución.

En este tipo de entornos, pretender que el dron siga con exactitud el modelo físico del terreno se traducirá en una mayor y más homogénea resolución del resultado final, pero también en mayor tiempo de vuelo, más fotografías tomadas, y más tiempo de procesamiento de las imágenes. En definitiva, su coste aumentará. Esto puede estar justificado en ciertas zonas, donde la diferencia de alturas es extrema en áreas muy pequeñas, pero es completamente innecesario en zonas donde la pendiente es poco pronunciada. Por esto, se debe pensar en un método capaz de realizar la función de seguimiento del perfil del terreno, y a su vez, que lo haga de la manera más óptima y eficiente posible.

### 4.3. Algoritmo

No existe, en la actualidad, ningún algoritmo abierto que permita adaptar un plan de vuelo a las características orográficas del terreno, a través de la variación de alturas, y que además, determine los *waypoints* que lo completarán, para operar de manera eficiente. Por esto hemos creado el software llamado Digital COMBO. Este software opera mediante tres programas distintos:



- **Mission Planner:** Un software libre y de código abierto disponible para Windows que permite generar un plan de vuelo completo para plataformas aéreas, sean o no tripuladas. Este plan de vuelo, generado a base de *waypoints* puede subirse directamente a la controladora de un dron para ejecutarse y que este vuele de forma autónoma sin necesidad de un piloto controlando sus movimientos.



Figura 4.9: Plan de vuelo de 5 *waypoints* generado por Mission Planner.

Este software, ampliamente utilizado debido a que es libre y muy intuitivo, no permite variar la altura del recorrido en función del terreno, ya que no dispone de información física relativa a este, sólo coordenadas geográficas.

- **Global Mapper:** Un software que integra un (SIG) Sistema de Información Geográfica y permite la organización, almacenamiento, manipulación, análisis y modelización de grandes cantidades de datos vinculados a una referencia espacial. Global Mapper trabaja con datos de vector, de ráster y elevación, proporcionando visualización, conversión y otras características.

En el caso de nuestra operativa, Global Mapper nos permitirá conocer la orografía y el relieve del terreno que queremos sobrevolar con dron, para así vincular una altura determinada a cada *waypoint* con coordenadas geográficas.

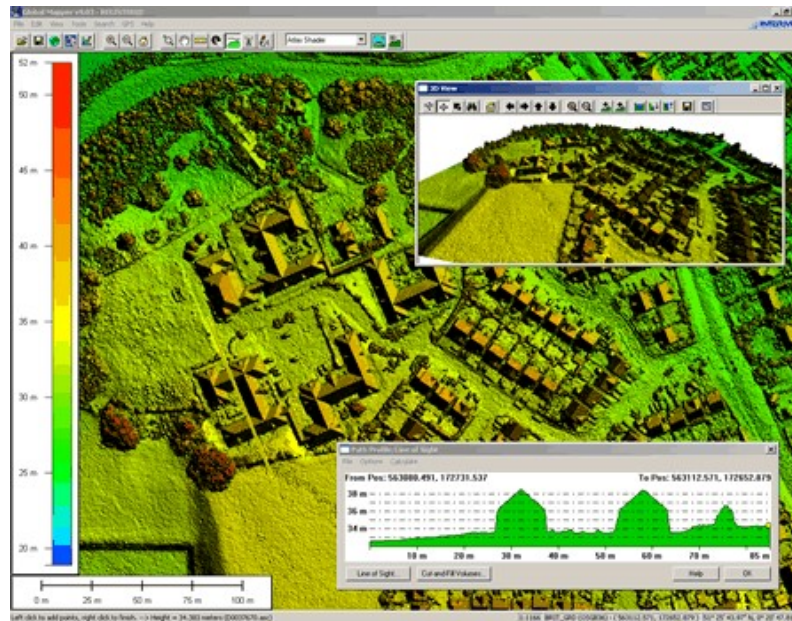


Figura 4.10: Modelo Digital de Superficie generado por el software Global Mapper.

- **Matlab:** Una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio. Permite manipular vectores con una gran potencia de cálculo, mediante la implementación de algoritmos y la creación de interfaces de usuarios.

Una vez definidas estas herramientas, podemos introducir Digital COMBO como el algoritmo basado en la interfaz de usuario de Matlab (GUI), que es capaz de recibir un plan de vuelo generado por Mission Planner, un vector de alturas generado por Global Mapper, y con ello crear un plan de vuelo reconocible para Mission Planner, con las alturas en todos sus *waypoints*.

Además de esta función, presente también en algunos softwares de propiedad, Digital COMBO es capaz de decidir, en función de las exigencias del usuario, que *waypoints* son necesarios y cuáles no, para optimizar así el recorrido del plan de vuelo.

Para decidir que *waypoints* no son necesarios, Digital COMBO genera un vector con las coordenadas geográficas de todos los *waypoints* del plan de vuelo generado por Mission Planner. Después, asigna a cada *waypoint* una altitud generada por Global Mapper. Finalmente, se crea un vector con la diferencia de alturas de un *waypoint* con su *waypoint* anterior y otro vector con la diferencia de alturas de este mismo *waypoint* con su consiguiente.

Si, por ejemplo, tenemos un circuito de 15 *waypoints* como el de la figura 4.11 y un fichero con las elevaciones del terreno dadas por Global Mapper (ver proceso detallado en la sección 4.5), el algoritmo generará la tabla 4.1.



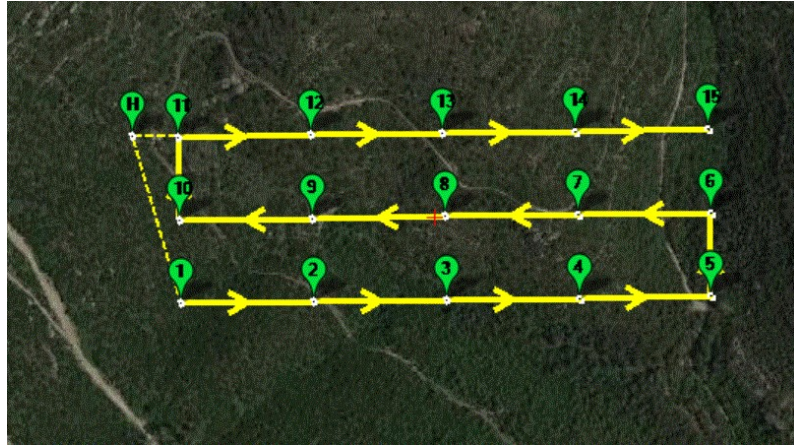


Figura 4.11: Ejemplo de un FlightPlan de 15 waypoints creado en Mission Planner.

Número de waypoint	Altura del waypoint (m)	Diferencia de altura $\ h^n - h^{n-1}\ $ (m)	Diferencia de altura $\ h^n - h^{n+1}\ $ (m)
1	748	-	4
2	752	4	2
3	750	2	54
4	696	54	9
5	705	9	50
6	755	50	14
7	741	14	12
8	753	12	13
9	740	13	40
10	700	40	50
11	750	50	10
12	760	10	13
13	757	13	2
14	759	2	9
15	750	9	-

Cuadro 4.1: Tabla generada por Digital COMBO a partir del plan de vuelo de la figura 4.11

Como se puede ver, la tercera columna contiene los datos de la diferencia altura entre un *waypoint* y el anterior, y la cuarta columna tiene las diferencias de los *waypoints* con sus consiguientes.

Seguidamente, Digital COMBO pide al usuario un valor de “corte”. Este valor define qué diferencia de altura es significativa para el usuario y cual se puede obviar, ya que de él pueden depender errores en las imágenes que se toman durante el vuelo (como la falta de homogeneidad en la resolución). Por ejemplo, si un usuario decide que el valor de corte sea 15 m, porque los errores derivados de desniveles inferiores se pueden negligir, el algoritmo solo considerará necesarios los *waypoints* 3, 4, 5, 6, 9, 10 y 11 (figura 4.12).

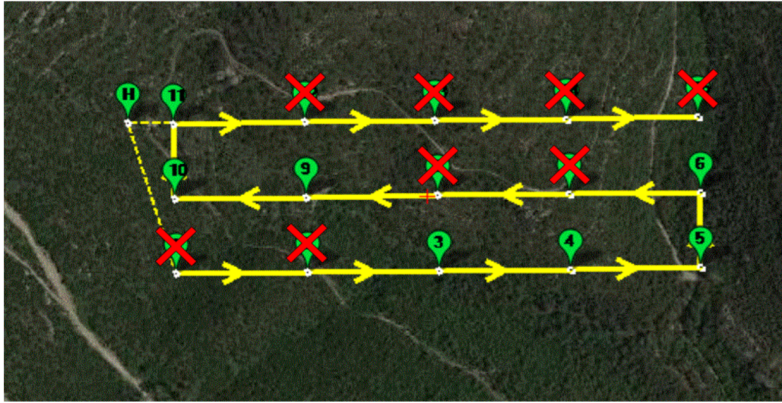


Figura 4.12: Resultado de la optimización con Digital COMBO del plan de vuelo de la figura 4.11.

No obstante, para que el plan de vuelo siga el circuito establecido, hay una serie de *waypoints* que no pueden ser eliminados, por muy innecesarios que sean. Estos *waypoints* pasarán a llamarse “intocables”, y serán el primero, el último, y todos aquellos que precedan un cambio de orientación del plan de vuelo.



Figura 4.13: Ejemplo en el que tanto el *waypoint* 4 como el 5 se consideran “intocables”, ya que al pasar por ellos el dron cambia la orientación de su vuelo.

Digital COMBO también pide al usuario una altura de vuelo, que será la que el dron dejará con respecto al nivel del suelo al pasar por cada *waypoint*. El algoritmo también debe tener en cuenta que, una vez un *waypoint* haya sido suprimido, no se genere una colisión con el terreno. Por lo tanto, si la posible eliminación de un *waypoint* crea un conflicto, el *waypoint* en cuestión pasará a considerarse “intocable”.

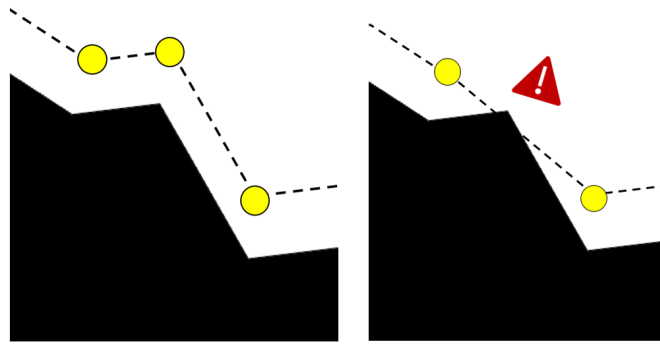


Figura 4.14: Ejemplo de una colisión con el terreno producto de la eliminación de un *waypoint*. El *waypoint* del medio no podrá eliminarse y pasará a considerarse “intocable”.

De esta forma, Digital COMBO identifica todos estos waypoints y los considera necesarios, con lo que el plan de vuelo generado por el algoritmo en nuestro ejemplo pasa a ser el siguiente (figura 4.15):

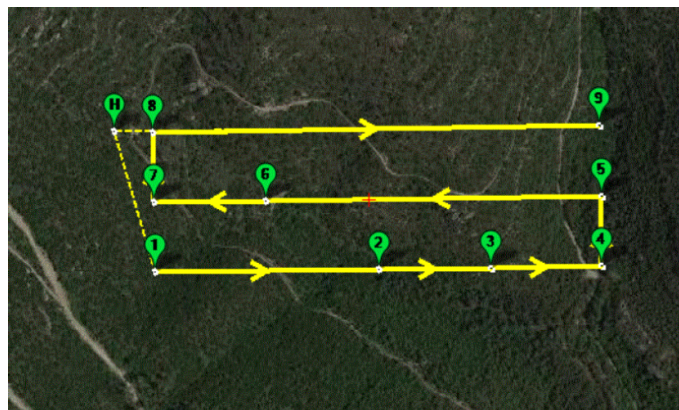


Figura 4.15: Plan de vuelo final optimizado con Digital COMBO del plan de vuelo de la figura 4.11.

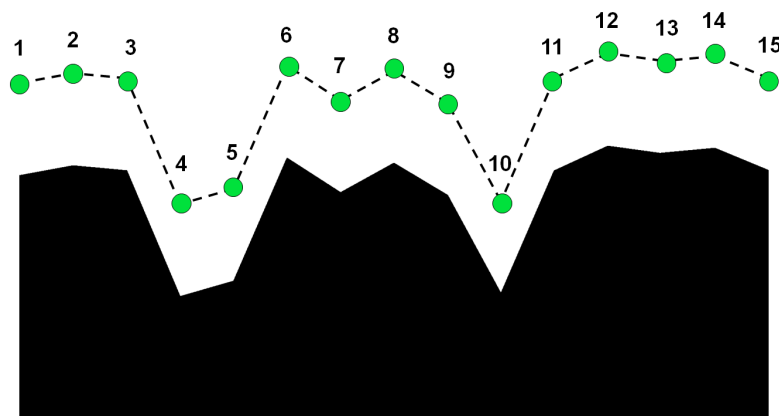


Figura 4.16: Perfil de elevación del plan de vuelo inicial del ejemplo de la figura 4.11.

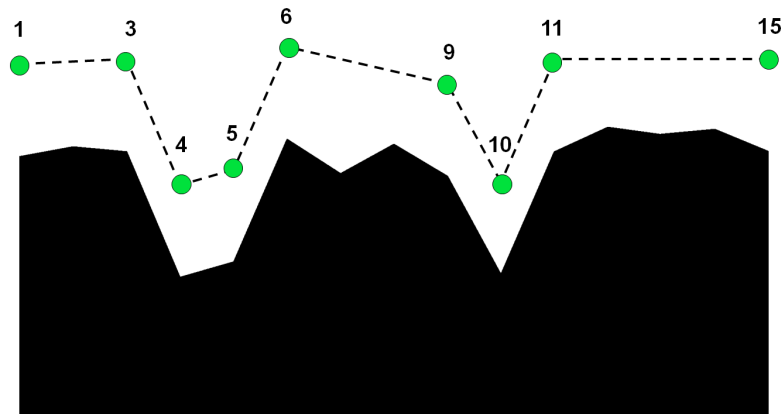


Figura 4.17: Perfil de elevación del plan de vuelo resultante de Digital COMBO (figura 4.15)

En conclusión, se puede ver que el algoritmo elimina todos los *waypoints* que no considera necesarios ni imprescindibles del plan de vuelo inicial, con el objetivo de optimizar la operación a la vez que se sigue la orografía del terreno para mantener la resolución. En función del valor de “corte” o del de la altura de vuelo que el usuario decida para su operación, Digital COMBO se encarga de eliminar los *waypoints* correspondientes.

## 4.4. Plataforma

Para esta fase del proyecto, no se ha recurrido al dron Mavic Pro Platinum, utilizado en la operativa para la obtención de datos a través del sistema de balizamiento (sección 3), ya que su estabilidad se podría ver afectada en este tipo de operaciones, en las que debemos evitar las vibraciones del vehículo para que no afecten en los resultados fotométricos. Por eso se ha decidido utilizar el dron *DJI-S900*, en el que el soporte de cardán<sup>1</sup> se separa del bastidor<sup>2</sup> principal con amortiguadores diseñados específicamente, consiguiendo reducir significativamente las vibraciones. Además, es uno de los drones más utilizados en la realización de operaciones de vuelo en el campo de la geomática y la agricultura, por lo que está preparado para ser equipado con distintos sensores, destinados a obtener información del terreno a través de la teledetección. Su uso ha sido ampliamente testado en estos campos, y se han obtenido resultados muy positivos, por lo que es la plataforma más óptima para realizar esta fase del proyecto. Sus características son las siguientes:

<sup>1</sup> Mecanismo de suspensión, consistente en dos círculos concéntricos cuyos ejes forman un ángulo recto, que permite mantener la orientación de un eje de rotación en el espacio aunque su soporte se mueva.

<sup>2</sup> Estructura que protege y mantiene los circuitos del dron.

<b>ESTRUCTURA</b>	
Distancia entre ejes diagonal	900 mm
Longitud del brazo del marco	358 mm
Peso del brazo del cuadro	316 g
Diámetro del marco central	272 mm
Peso del cuadro central	1.185 g
Tamaño del engranaje de aterrizaje	460 mm x 450 mm x 360 mm

Cuadro 4.2: Características estructurales del dron DJI-S900.

<b>MOTOR</b>	
Tamaño del estator	41 mm x 14 mm
KV*	400 rpm/V
Potencia máxima	500 W
Peso	158 g

Cuadro 4.3: Características del motor del dron DJI-S900.

(\*) El número de revoluciones por minuto que hará el motor por 1 V, y determina cuán rápido el motor puede girar a un voltaje determinado.

<b>ESC (Electronic Speed Controller)</b>	
Intensidad de trabajo	40 A
Voltaje de trabajo	6S LiPo (22,2 V)
Frecuencia de la señal	30 Hz - 450 Hz
Peso (con radiadores)	35 g

Cuadro 4.4: Características ESC del dron DJI-S900.

<b>PARÁMETROS DE VUELO</b>	
Peso al despegue	4,7 kg - 8,2 kg
Peso total	3,3 kg
Consumo máximo de potencia	3.000 W
Consumo de potencia en <i>hover</i> (*)	1.000 W
Tiempo de <i>hover</i>	18 min
Temperatura ambiente de operación	-10°C - +40°C

Cuadro 4.5: Parámetros de vuelo del dron DJI-S900.

(\*) Vuelo estacionario, en el que un objeto queda suspendido en el aire en una posición estable.

Este proyecto está planteado para realizar vuelos en sitios de cotas muy elevadas y en épocas del año en las que las temperaturas son bajas. Es por eso que hay que tener constancia de que las temperaturas de los sitios dónde se volará serán extremadamente bajas, pudiendo llegar a los -20°C.



Cómo se ha especificado en el cuadro 4.5, esta plataforma está diseñada para operar dentro de un margen de temperatura externa de  $-10^{\circ}\text{C}$  -  $+40^{\circ}\text{C}$ . Esto está relacionado con la mecánica de los motores y la autonomía de la batería. Para este caso, el dron opera con baterías del fabricante *Tattu Plus* con las siguientes características (cuadro 4.6):

<b>BATERÍA</b>	
Modelo	LiPo 6S1P
Configuración	6S1P 22,2 V 6 células
Ratio de descarga	15 C
Tasa de ráfagas de descarga máx.	30 C
Peso neto	2.063 g
Dimensiones	202 mm x 83 mm x 70 mm

Cuadro 4.6: Características de la batería *Tattu Plus LiPo 6S1P*.

Al ser una batería de polímero de iones de litio (LiPo), su capacidad se reducirá a medida que la temperatura disminuya. El tiempo máximo de funcionamiento de baterías LiPo se alcanza a temperaturas de  $25^{\circ}\text{C}$  (temperatura de ambiente normal). A  $0^{\circ}\text{C}$  la capacidad de la batería se vería reducida llegando a ser solo el 80 % de la que sería a temperatura de ambiente normal. En el caso extremo de  $-20^{\circ}\text{C}$ , la capacidad de la batería puede llegar a reducirse hasta un 40 %. Además, a temperaturas muy bajas la vida útil de la batería también se reduce, funcionando cada vez durante periodos más cortos, y llegando a fallar con mucha más frecuencia [17].

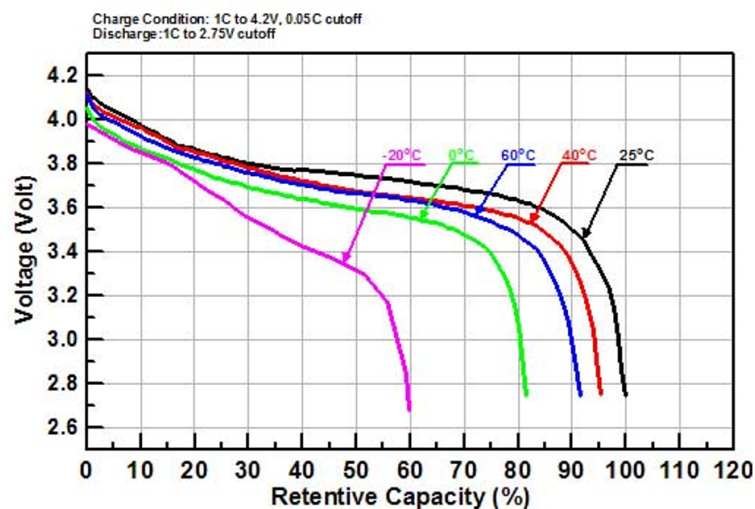


Figura 4.18: Ratio de disminución de la capacidad de una batería LiPo en función de la temperatura ambiente.

Para solucionar este problema se recomienda almacenar la batería en un lugar cálido antes de conectarse al dron, ya que después, esta se calentará mientras el dron esté operando y su capacidad no se verá tan afectada. Además de esto, un método eficaz para mantener una batería a temperatura óptima y que no llegue a bajar de  $+20^{\circ}\text{C}$ , es la

utilización de adhesivos aislantes, muy comunes y de gran utilidad para volar en zonas donde el clima es frío [18].



Figura 4.19: Adhesivos aislantes para el mantenimiento de la batería.

## 4.5. Validación del método

Para probar el funcionamiento del método de la operativa y saber si su uso se justifica se ha propuesto utilizar el algoritmo Digital COMBO para optimizar un plan de vuelo real. La zona convenida para analizar ha sido un terreno montañoso cerca de Cardona (Cataluña). Se trata de un terreno cuyo punto más elevado está a 759,62 metros sobre el nivel del mar y su punto menos elevado a 630,32 metros sobre el nivel del mar, por lo que cuenta con un desnivel de 129,3 metros.



Figura 4.20: Polígono generado por Mission Planner en el terreno montañoso de Cardona.

Para simular una operación con tecnología dron lo más realista posible se ha utilizado un dron DJI-S900, equipado con una cámara multiespectral<sup>3</sup> MicaSense aunque, en este proyecto, solo necesitaremos las imágenes tomadas en banda RGB<sup>4</sup>.

<sup>3</sup>Una cámara multiespectral es capaz de captar varios espectros de luz. Las cámaras multiespectrales que se montan en los drones son de pequeñas dimensiones y pueden llegar a tomar valores de hasta 6 bandas espectrales.

<sup>4</sup>En banda RGB solo se pueden captar e interpretar los colores tal y como nosotros los vemos.



Figura 4.21: Dron DJI-S900 utilizado en el vuelo de Cardona, equipado con una cámara multispectral MicaSense.

Para realizar la comparativa entre el plan de vuelo más adecuado para este proyecto y un plan de vuelo convencional, se ha creado un polígono en Mission Planner que abarque toda el área de estudio (figura 4.20). A partir de este polígono se han generado 4 tipo de operaciones diferentes:

- **Plan de vuelo 1:** Vuelo convencional con pasadas a una altura constante respecto a 100 m desde el punto más elevado de la zona.
- **Plan de vuelo 2:** Vuelo a 100 metros respecto el terreno siguiendo la orografía con una opción de Google Earth integrada en Mission Planner.
- **Plan de vuelo 3:** Vuelo a 100 metros del terreno siguiendo *waypoints* creados por Digital COMBO sin ser optimizado.
- **Plan de vuelo 4:** Optimización del plan de vuelo 3, a 100 metros de la superficie, mediante Digital COMBO.

El plan de vuelo 1 se ha generado con Mission Planner mediante la opción “Auto waypoints”, que en función de la altura de vuelo y de la cámara embarcada, genera un número determinado de *waypoints* colocados para que el dron realice su trayectoria abarcando toda la superficie del polígono.

Al tratarse de un vuelo a altitud constante, hemos podido apreciar que el dron ha sido capaz de realizar todo el recorrido previsto en un tiempo de 20 minutos.





Figura 4.22: Gráfico de la altura respecto al punto en que el dron ha despegado (home) en función del tiempo. Resultados para el plan de vuelo 1.

No obstante, aunque la autonomía de la operación ha sido muy buena, hay que tener en cuenta que el dron ha volado a una altura absoluta<sup>5</sup> constante de 860 metros. Esto significa que en el punto más elevado del terreno el dron se encontraba a 100,38 metros del suelo, y en el punto de menos elevación a 229,68 metros. Por lo tanto, a partir de la formula 4.2 introducida en esta sección, podemos ver cuál será la relación máxima de resoluciones, que será la misma que la relación de escalas:

$$\text{Diferencia de escalas} = \frac{\frac{\text{Altura máxima de vuelo}}{\text{Distancia focal de la cámara}}}{\frac{\text{Altura mínima de vuelo}}{\text{Distancia focal de la cámara}}} = \frac{\text{Altura máxima de vuelo}}{\text{Altura mínima de vuelo}} = 2,29 \quad (4.3)$$

En conclusión, aunque el tiempo de vuelo y el desgaste de las baterías han sido muy positivos, la resolución de las imágenes tomadas puede llegar a tener variaciones que hagan que la resolución de una imagen sea 2,29 veces la escala de otra.

En el plan de vuelo 2 se ha utilizado una función incluida en Mission Planner llamada "Terrain". Dicha función utiliza el modelo orográfico del terreno generado por Google Earth para que el dron se mantenga siempre a una altura constante del terreno. Su función es similar a la de Digital COMBO, pero no crea *waypoints* ni optimiza la ubicación de estos.

<sup>5</sup>Altura absoluta: Distancia vertical entre un nivel, punto u objeto considerado como referente y el nivel del mar.



Figura 4.23: Modelo Digital del Terreno generado por Google Earth.

Esta función no está adaptada para vuelos en zonas con variaciones de terreno significativas, como es el caso de Cardona. Cuando se ha probado se ha visto que su uso en este tipo de terrenos comporta aceleraciones verticales repentinas, creando oscilaciones en el eje lateral del dron (pitch) que pueden fluctuar entre valores de  $\pm 20^\circ$ , desestabilizando el dron y poniendo en riesgo su seguridad. A consecuencia de esto el plan de vuelo 2 ha tenido que abortarse habiendo completado menos del 20 % de su recorrido.

El plan de vuelo 3 se ha generado mediante Digital COMBO (proceso detallado en la sección 4.5.1), que ha creado un recorrido de waypoints en que cada uno de ellos varia su altura para situarse a 100 metros sobre el nivel del terreno. Para tener unos valores precisos del nivel del terreno se ha utilizado el modelo de nube de puntos público del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), generado mediante un sensor LiDAR (ver sección 4.1.1) [19].

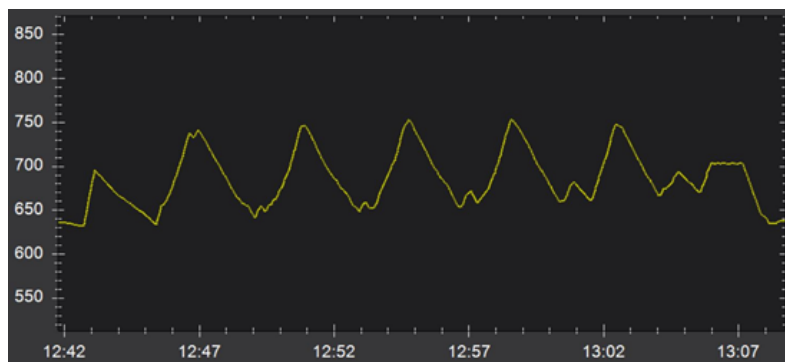


Figura 4.24: Gráfico de la altura respecto al punto en que el dron ha despegado (home) en función del tiempo. Resultados para el plan de vuelo 3.

En este caso el dron ha seguido con gran precisión y estabilidad la orografía de la zona, manteniéndose en todo momento a 100 metros del nivel del terreno. Esto ha permitido mantener una resolución homogénea en todas las fotografías tomadas. Sin embargo, cómo ya se había intuido y expuesto en la sección 4.2.1, el alcance del dron se ha visto reducido. La batería *LiPo 6S1P*, utilizada para este dron, tiene una autonomía máxima experimental de 25 minutos. En este tiempo el dron solo ha podido completar un 89 %

del plan de vuelo previsto. Este desgaste de batería se ha debido, principalmente, a la constante necesidad del dron de modificar su velocidad vertical, aumentando la potencia de los motores y consumiendo más batería de la que ha consumido con el plan de vuelo 1, a altitud constante.



Figura 4.25: Dron DJI-S900 realizando el plan de vuelo 3 en Cardona.

Mediante simulación, con el programa Mission Planner, se ha podido determinar que el tiempo total para la realización del vuelo completo habría sido de 28 minutos, un 40 % más que en el caso del plan de vuelo 1.

El plan de vuelo 4 también se ha generado mediante Digital COMBO, del mismo modo que el plan de vuelo 3, aunque esta vez, ha sido optimizado con la función de optimización del propio algoritmo (ver proceso detallado en la sección 4.5.1). Para realizar dicha optimización, se ha establecido un valor de corte de cota de 6,5 metros. Este valor se ha elegido arbitrariamente, teniendo en cuenta que la variación media en el terreno analizado, según indica el modelo de nube de puntos de PNOA, es de 5,9 metros por cada waypoint. Se ha visto, mediante Digital COMBO, que con un valor de corte de cota de 6,5 metros se eliminan un 40 % de los *waypoints*, y se ha establecido esta reducción como óptima al considerarse significativa pero no excesiva.

Este plan de vuelo no se ha podido realizar experimentalmente debido a incidencias ajenas al proyecto, por lo que ha sido simulado enteramente mediante Mission Planner.

Como resultado, la simulación nos ha indicado que el vuelo se hubiera podido completar en un tiempo de 24,8 minutos, aumentando el tiempo de vuelo tan solo un 28,5 % respecto del plan de vuelo 1, pero teniendo tiempo de completar todo el circuito establecido en su totalidad sin agotar la batería.

En este caso, se puede ver que se sufrirán variaciones máximas de resolución que no sobrepasarán el 1,065 %, por lo que se mantendrá prácticamente homogénea, y el dron podrá realizar la totalidad del recorrido sin necesidad de cambiar la batería.

#### 4.5.1. Funcionamiento de Digital COMBO

Digital COMBO es el nuevo software que permite generar planes de vuelo adaptados para UAVs de manera eficiente. Este programa se ha utilizado en la planificación de los planes de vuelo 3 y 4 de la sección 4.3, y se ha observado que se consiguen buenos resultados.

Debido a su relevancia en el proyecto, se cree necesario detallar su uso. Esto se hará a través del último plan de vuelo generado (plan de vuelo 4).

Para empezar con el procedimiento, se ha definido un polígono en Mission Planner que delimita el área que se quiere analizar (figura 4.20) y, mediante la opción “Auto waypoints”, se han generado dos trayectorias diferentes.

La primera se ha generado mediante el comando *CAM\_TRIGG\_DIST*, que está incluido dentro de la opción “Auto waypoints”, y establece la formación del plan de vuelo en función del tiempo que tarda la cámara embarcada en el dron en tomar una fotografía, es decir, las fotos se tomarán cada cierto tiempo, sin que deba existir un *waypoint* en dicho punto. Por lo tanto, que sólo se generaran *waypoints* en los puntos geográficos en que el dron debe cambiar la orientación de su recorrido. El plan de vuelo 1 de la sección 4.5 también se ha generado mediante esta opción (figura 4.26).

La segunda trayectoria se ha generado mediante el comando *DO\_DIGICAM\_CONTROL*, también incluido dentro de la opción “Auto waypoints”. Este comando genera *waypoints* en todos los puntos geográficos en que la cámara, embarcada en el dron, debe tomar fotografías. Dichos *waypoints* se distribuirán en función del modelo de la cámara (figura 4.27).

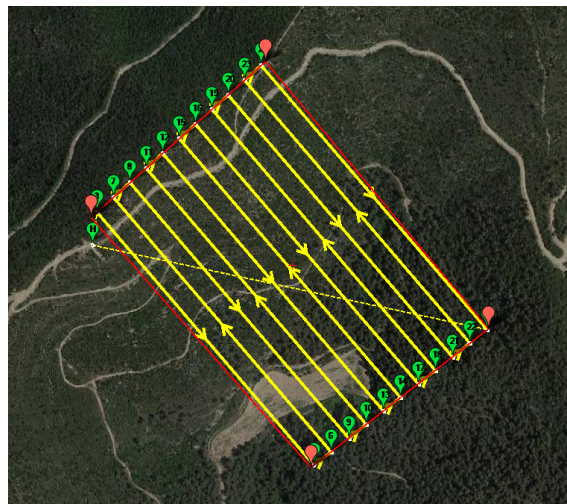


Figura 4.26: Plan de vuelo generado en un polígono mediante el comando *CAM\_TRIGG\_DIST*



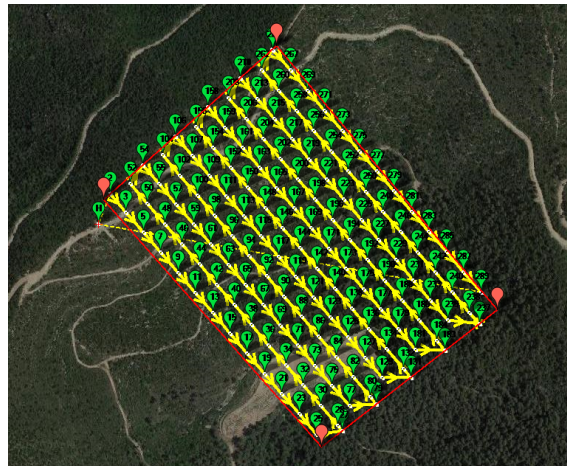


Figura 4.27: Plan de vuelo generado en un polígono mediante el comando *DO\_DIGICAM\_CONTROL*

La razón por la que se generan dos trayectorias diferentes es para cubrir la carencia que tiene Mission Planner a la hora de crear un vuelo con *DO\_DIGICAM\_CONTROL* que contenga *waypoints* en todos puntos geográficos de la línea que delimita el polígono (figura 4.28). Al crear las dos trayectorias, podemos sobreponerlas, de manera que los *waypoints* del borde queden incorporados en la trayectoria creada con el comando *DO\_DIGICAM\_CONTROL*.

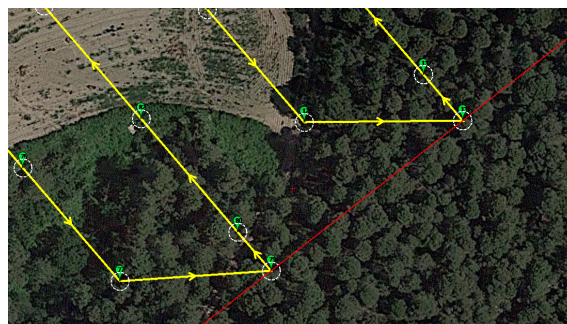


Figura 4.28: Carencia generada por el comando *DO\_DIGICAM\_CONTROL* en un plan de vuelo.

A continuación, puesto que Mission Planner tiene la opción de extraer sus planes de vuelo en formato de texto (.txt), se ha decidido que este sea el formato con el que trabaja Digital COMBO. Una vez definido esto, el algoritmo pide al usuario los siguientes datos:

- Fichero de texto (.txt) del plan de vuelo generado con *CAM\_TRIGG\_DIST*.
- Fichero de texto (.txt) del plan de vuelo generado con *DO\_TDIGICAM.TCONTROL*.
- Altura sobre el nivel del terreno a la que se quiere realizar el vuelo final.
- Velocidad de crucero a la que se quiere realizar el vuelo final.
- Valor de corte para el cual se decidirá que un desnivel del terreno es despreciable.

El algoritmo se encarga de unir los dos planes de vuelo en uno de solo y genera un nuevo fichero de texto (.txt) con las coordenadas geográficas de todos los waypoints del vuelo y el formato específico para introducirse en el programa Global Mapper. En este programa se debe juntar tanto el fichero generado por Digital COMBO como la nube de puntos descargada de PNOA [ref]. El mismo Global Mapper permite realizar un Modelo Digital del Terreno utilizando un proceso de triangulación mediante la nube de puntos de PNOA, y también permite establecer la altura del terreno en todos los puntos del fichero, creado por Digital COMBO, mediante este MDT.

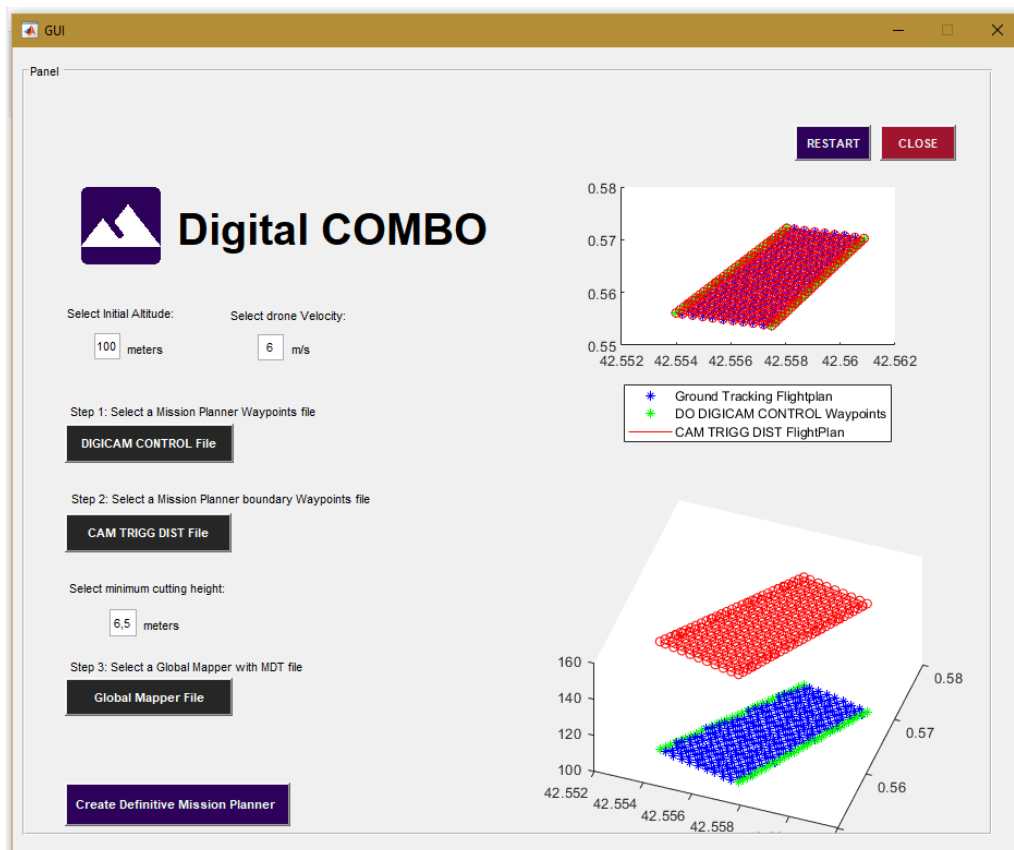


Figura 4.29: Interfaz gráfica para los usuarios de Digital COMBO.

Una vez se tiene el nuevo fichero con los puntos geográficos y su altura sobre el nivel del mar se debe introducir en Digital COMBO, que lo adapta para que Mission Planner lo reconozca como plan de vuelo. En este punto se tiene un vuelo que sigue la orografía de la zona con gran precisión (es así como se ha creado el plan de vuelo 3 de la sección 4.5).

No obstante, para completar del todo el proceso, el algoritmo se encarga de eliminar waypoints del vuelo en función del valor de corte que el usuario ha introducido, generando un último plan de vuelo que sigue la orografía del terreno y a la vez está optimizado para tener una mayor autonomía. (Este es el resultado final del plan de vuelo 4 del apartado 4.5)

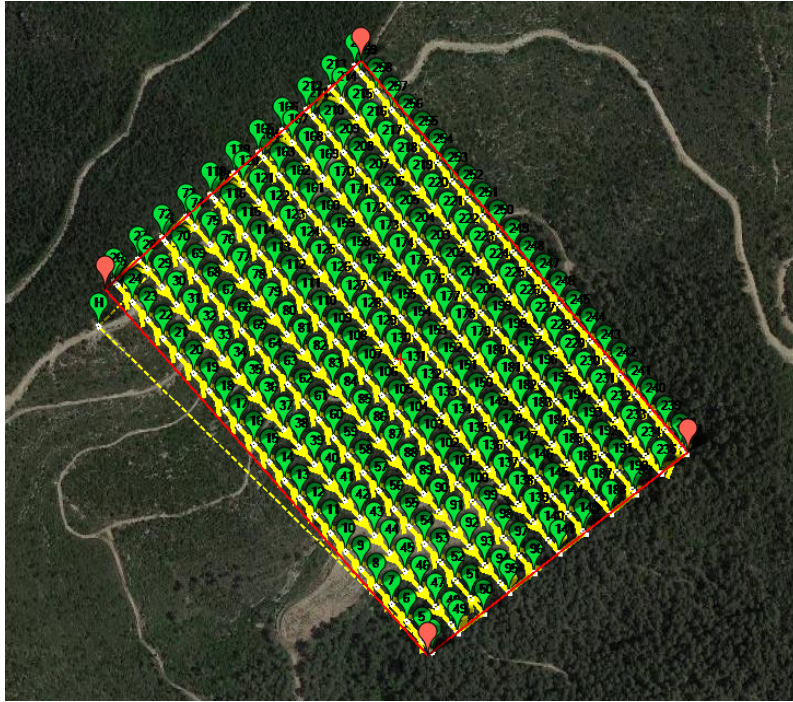


Figura 4.30: Plan de vuelo 3, siguiendo el terreno a 100 metros de altitud en todo momento en la zona de Cardona.

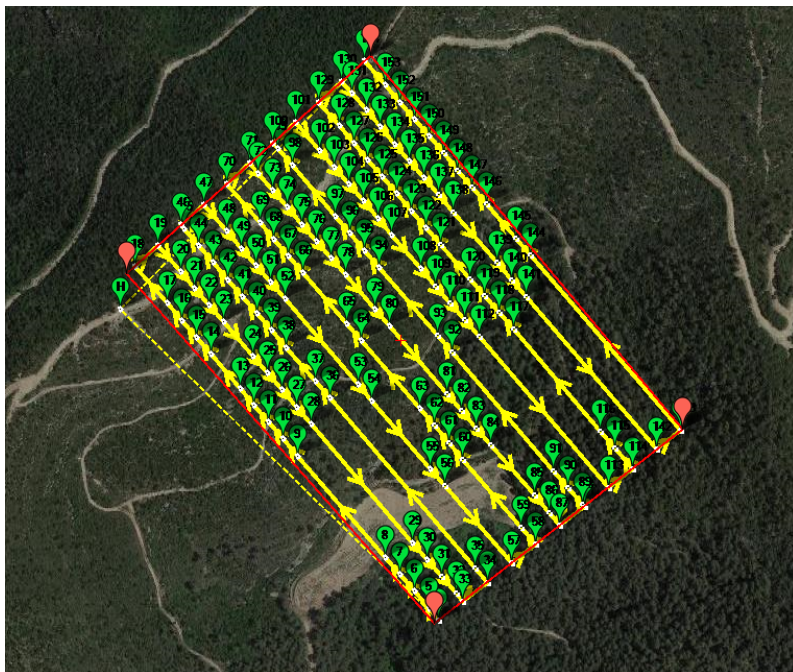


Figura 4.31: Plan de vuelo 4, optimización del plan de vuelo 3 en la zona de Cardona.

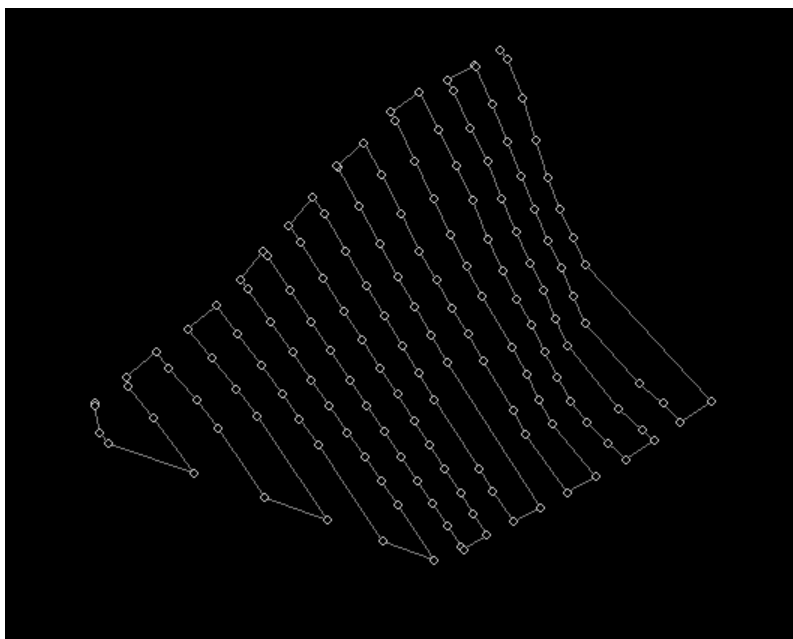


Figura 4.32: Comparativa en 3 dimensiones del plan de vuelo 3 en la zona de Cardona.

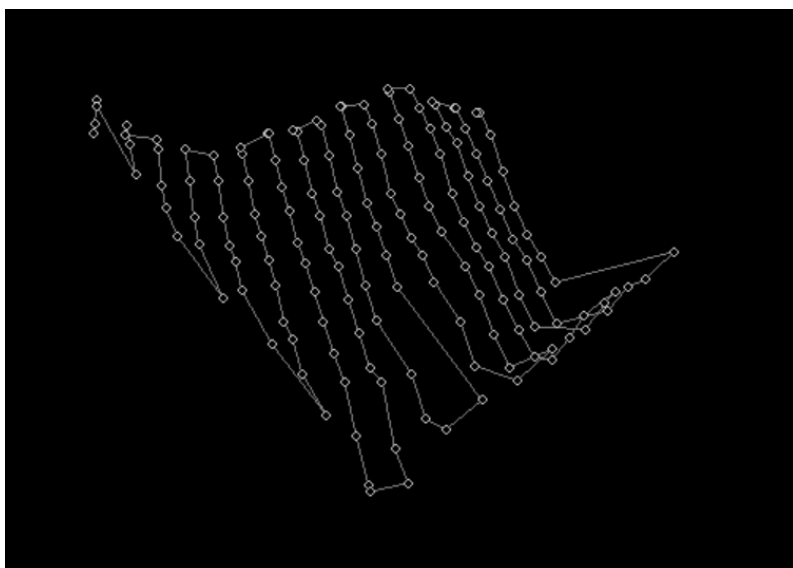


Figura 4.33: Comparativa en 3 dimensiones del plan de vuelo 3 en la zona de Cardona.



# CONCLUSIONES

Este proyecto planteaba la superación de un reto, tanto tecnológico como operacional, que pudiera ofrecer una mejora y subir un escalón en el grado de innovación del sistema de control y prevención de aludes actual. Este propósito se quiso emprender a través de un sistema de control, formado por balizas dotadas de sensores ultrasónicos y de temperatura, que se comunicaran con un dron que facilitara la información obtenida sobre las características del estado del manto nivoso, y a través de un seguimiento continuo con un vuelo adaptado, que permitiera obtener una resolución homogénea en la fotogrametría, para el control preciso y el pronóstico detallado del estado de riesgo que podría sufrir una zona cubierta de nieve.

Conocer el origen y las causas que suscitan la generación de los aludes, nos ha permitido avanzar en un proyecto en el que, como objetivos remarcables, se quería detectar y amiorar las consecuencias que se propician en las regiones afectadas por estos fenómenos.

Así pues, una vez realizado el proyecto y con diversos resultados experimentales obtenidos, si analizamos los objetivos que se marcaron en el proyecto, sabremos si finalmente estos han sido satisfactorios.

- **Detección preventiva de riesgos:** Este primer objetivo es el que encabeza el proyecto, ya que es la solución general que se pretende conseguir. Particularmente, este objetivo no ha quedado probado, ya que no se ha podido poner en marcha todo el sistema global. Sin embargo, con los experimentos realizados en el capítulo 2, con el diseño implementado en el sistema de balizamiento (testado varias veces en el proyecto 'ixorigué'), y con el vuelo adaptado llevado a cabo en Cardona (capítulo 4), en el que se obtuvieron unos resultados muy positivos, podemos decir que el sistema en conjunto estaría preparado para una ágil implementación, eficaz tanto en la obtención de datos como en la fotogrametría para el seguimiento continuo, y capaz de dar resultados significativos.
- **Mejora en la distancia de actuación:** La distancia de actuación es uno de los objetivos más característicos de este proyecto, ya que, permitir la obtención de datos a largas distancias, alejadas de zonas habitadas para la localización de una estación de control, es un reto muy significativo, por tratar en zonas con desniveles frecuentes, que podrían dificultar la comunicación y causar interferencia. Incorporar un dron en la recogida de información, permite llegar a zonas en las que no se podría establecer la comunicación, ya sea por su orografía, por su desnivel o por ser una zona de riesgo.

Esta vez, aunque el planteamiento realizado en la duración del proyecto solo ha sido teórico, podemos afirmar que con este método de comunicación y obtención de datos se consiguen resultados positivos y relevantes, por su repetido testeo en el proyecto 'ixorigué', realizado por la empresa HEMAV. S.L, y por la planificación detallada de su incorporación realizada durante este proyecto.

- **Reducción en el tiempo de aplicación del servicio:** Actualmente, para tener un control del riesgo de que se produzca un alud, se necesitan varias personas cualificadas, que suban hasta una zona donde se sospeche que pueda desencadenarse uno de estos fenómenos, para hacer mediciones de las características en los diferentes estratos de la nieve, y así poder calcular la posibilidad de que se produzca

un alud y dar un valor de riesgo estimado. Este método es de alto riesgo, y con una frecuencia de actuación que suele ser de una vez cada semana, debido a que su desarrollo requiere de una inversión de tiempo significativa. De esta forma, el objetivo de reducir el tiempo de aplicación, que nos permite a su vez aumentar la frecuencia en la que se repite el proceso de control, aplicaría satisfactoriamente, ya que los datos del estado del manto podrían obtenerse aproximadamente en 10-15 min, y desde una posición fija. Además, el sistema está planteado para ofrecer una disponibilidad diaria, sobre la información del estado de los estratos, si esto fuera necesario.

- **Aumento de la precisión y la calidad de los estudios:** Obtener información de los puntos más arriesgados de las zonas a analizar, a través de la distribución de los dispositivos del sistema de balizamiento de este proyecto, es una solución que consigue mejores resultados que con la extrapolación de las características de puntos de menor riesgo. Si bien no se ha podido realizar la instalación del sistema para la resolución experimental, se tiene una gran convicción sobre la eficacia y las ventajas que ofrece esta distribución en la toma de datos, y en la relevancia de los resultados, que permitan elaborar pronósticos precisos y fiables del nivel de riesgo de una zona y de la probabilidad que en esta, alguien pueda sufrir daños propiciados por la generación de un alud. No obstante, se han realizado distintas pruebas con los sensores de ultrasonidos, para comprobar su funcionamiento y la fiabilidad de las medidas obtenidas. Como se comentaba en la descripción de resultados finales obtenidos, la potencia y la directividad de estos dispositivos es importante para su aplicación en los entornos deseados, por lo que se debería disponer de sensores con mejores prestaciones, en estos aspectos.
- **Aumento de la seguridad:** La seguridad de los individuos, ya sean trabajadores, colaboradores o usuarios de la zona, es uno de los objetivos más remarcables de este proyecto. El desarrollo y la ejecución del plan de control y prevención, se enfoca en todo momento en mantener la seguridad de aquellos que utilicen el sistema y analicen los posibles riesgos de una región. Con el sistema en funcionamiento, este objetivo aplicaría satisfactoriamente, puesto que los investigadores no se verán obligados a subir a puntos ni zonas de alto riesgo, los usuarios podrán mantenerse informados con antelación de los distintos riesgos de la zona, y la actuación preventiva alrededor de estas zonas, como el cierre de algunas pistas o incluso carreteras, quedará regulada y será más productiva.

Aun con todas las ventajas y la aplicación satisfactoria de los objetivos de este proyecto, las condiciones en las que se debe reproducir el funcionamiento del sistema de control, supone un reto importante, reflejado en el planteamiento que se ha seguido para la adaptación de los distintos dispositivos y las técnicas diseñadas con la intención de ofrecer un sistema ergonómico, manejable y eficaz, en cuanto a la acomodación del sistema en una zona desnivelada, la facilidad de uso y la comprensión de la información obtenida y la productividad global que ofrece. Las temperaturas a las que debe exponerse durante su actuación, nos han llevado a pensar en métodos de protección térmicos, como el que se ha visto en la sección 4.4, así como la localización de las baterías dentro de las balizas, pensada para prevenir la deteriorización prematura de estas, o calentar las baterías utilizadas en los drones que realizan los vuelos para la fotogrametría. No obstante, este factor sigue imponiendo un grado de sospecha, que lleva al sector tecnológico a la investigación

y el desarrollo de mejoras, con las que superar las adversidades que se sufren con estas condiciones ambientales, y que, en cuanto a este proyecto, suponen un beneficio significativo y muy provechoso, que podría garantizar un acondicionamiento superior, y una mejor consistencia en el funcionamiento del sistema.

Por otra parte, análoga al plan de mejora y desarrollo del sistema, se han buscado actividades, de asociaciones, entidades o sectores, que pudieran dar soporte a la implementación extendida de este proyecto, garantizando su existencia y su longevidad. Existen, por ejemplo, actividades de invierno como el *heliski*, que consiste en esquiar fuera de pista, accediendo a través de un helicóptero. Los usuarios que practican esta actividad, suelen buscar condiciones específicas, difíciles de reproducir en terrenos altamente manipulados como las pistas de esquí, como la nieve fresca o las pendientes pronunciadas, aunque la mayoría no suele tener conocimientos sobre las zonas de alta montaña. Una de las mayores preocupaciones de seguridad de las compañías de *heliski* es el peligro de aludes y, puesto que el perfil de los practicantes sigue aumentando, proponer la implementación de un sistema de control de aludes como el de este proyecto podría resultarles muy beneficioso. Se podría mantener informados a los usuarios de esta actividad sobre los niveles de riesgo de las hectáreas de las que disponen este tipo de entidades, proporcionándoles mayor conocimiento para su criterio delante de las distintas situaciones de riesgo. Eso podría aumentar el nivel de confianza de los usuarios en este tipo de actividades, que se podría reflejar en un incremento del comercio.

Otro factor relevante de este proyecto, es el reducido impacto que ocasiona sobre el medio ambiente. El uso de tecnología dron, necesaria para la comunicación del sistema y la obtención de los datos, puede ser la mejor aliada para la naturaleza y el ecosistema de una zona, en comparación con otras alternativas disponibles para esta actividad, como por ejemplo, la disposición de varias antenas por la superficie de la montaña, o el uso de vehículos motorizados que se utilizan actualmente para subir al lugar donde se elaboran los estudios de la nieve. Los drones utilizados en este proyecto, al ser eléctricos, no necesitan quemar combustible para la alimentación de sus motores, y su contaminación acústica es mínima. Por otra parte, las medidas realizadas a través de los sensores del sistema de balizamiento, son inocuas y no producen ninguna alteración en la zona de aplicación. Además, en la disposición sobre el terreno de las balizas, se ofrece un espaciado entre ellas suficiente para dejar libres algunas zonas en las que se pueden practicar actividades, por ejemplo, el *heliski*, comentado anteriormente, en el que se necesita dejar espacio para las maniobras y los descensos de sus usuarios.

Sin embargo, partiendo de la base generada en este proyecto, se abren las puertas a la innovación, a través de posibles mejoras en el sistema. Dentro del marco de esta iniciativa, se han propuesto una serie de avances, los cuales sería interesante estudiar su viabilidad para su posible incorporación:

- Para la recogida de información meteorológica como la velocidad y dirección del viento y la humedad relativa del ambiente, se podrían añadir dispositivos capaces de ofrecer estos datos, como se ofrecen en las estaciones meteorológicas fijas. La incorporación de un anemómetro y un higrómetro digitales en algunas de las balizas distribuidas, podría garantizar dicha información, que a su vez, sería más precisa y fiable por situarse en una posición más cercana a la región analizada, que la que se obtiene actualmente con una estación fija.

- Se podría añadir un sistema de detección de errores, que garanticen la integridad global del sistema, proporcionando alarmas cuando, por ejemplo, uno de los dispositivos del conjunto no funcione correctamente, o proporcione datos incoherentes.
- La implementación del algoritmo creado para este proyecto, podría incorporarse en uno de los programas de código abierto existentes para la creación de rutas y planes de vuelo, como por ejemplo Mission Planner, evitando así la necesidad de disponer y depender de distintas interfaces a la vez.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ayora Hirsch, A. “Seguridad y responsabilidad en accidentes por aludes de nieve”. *Acciones e Investigaciones Sociales*. **volumen**(31), pagina7–pagina38. (2012) [1](#)
- [2] Williams, K. “Avalanche Fatalities in the United States, 1950-1975”. *USDA Forest Service Research Note RM*. **volumen**(300), pagina1–pagina4. (1975) [1](#)
- [3] García-Dihinx, J. “Tipos de aludes”. *Montaña Segura*. **web**(<http://montanasegura.com/tipos-de-aludes1/>), (2017) [2](#)
- [4] Avilés Soler, C. “Saber leer los avisos de la nieve para anticiparse a las avalanchas”. *El País*. **web**([https://elpais.com/ccaa/2013/02/22/madrid/136156281\\_934310.html](https://elpais.com/ccaa/2013/02/22/madrid/136156281_934310.html)), (2013) [3](#)
- [5] “Riesgos Geológicos: Prevención y planificación de aludes”. *Ministerio del Interior*. **web**(<http://www.proteccioncivil.es/riesgos/aludes/presentacion>), (2018) [5](#)
- [6] Avilés Soler, C. “Saber leer los avisos de la nieve para anticiparse a las avalanchas”. *El País*. **web**([https://elpais.com/ccaa/2013/02/22/madrid/136156281\\_934310.html](https://elpais.com/ccaa/2013/02/22/madrid/136156281_934310.html)), (2013) [5](#)
- [7] “Escala Europea de Peligro de Aludes”. *Conselh Generau d’Aran*. **web**(<http://lauegi.conselharan.org/escala-europea-de-peligro-de-aludes/>), (2018) [6](#)
- [8] Okorn, R; Brunhofer, G; Platzer, T; Heilig, A; Schmid, L; Mitterer, C; Schweizer, J; Eisen, O. “Upward-looking L-band FMCW radar for snow cover monitoring”. *Cold Regions Science and Technology*. **volumen**(103), pagina31–pagina40. (2014) [9](#)
- [9] Marshall, P; Schneeebeli, M; Koh, G; Matzl, M; Pielmeier, C. “Snow stratigraphy measurements with high-frequency FMCW radar: Comparison with other snow science instruments”. *Cold Regions Science and Technology*. **volumen**(47), pagina108–pagina117. (2007) [10](#)
- [10] Casanella Alonso, R. “Liquid interface level sensing using electrode arrays”. *Universitat Politècnica de Catalunya*. (2007) [12](#)
- [11] Gudra, T; Najwer, L. “Ultrasonic Investigation of Snow and Ice Parameters”. *Acta Physica Polonica A*. **volumen**(120), pagina625–pagina629. (2011) [14](#)
- [12] Barnard, M. “Tesla & Google Disagree About LIDAR — Which Is Right?”. *Clean Technica*. **web**(<https://cleantechnica.com>), (2016) [15](#)
- [13] HEMAV S.L.; Monte de Estós; ESNEPI “IXORIGUÈ Project: Drones en ganadería extensiva de alta montaña”. *HEMAV S.L.*. **web**(<http://ixorigue.trackglobe.es/>), (2017) [21](#)
- [14] Pantoja L. “Metamorfosis de la Nieve”. *REC Mountain*. **web**(<http://recmountain.com/metamorfosis-de-la-nieve/>), (2017) [27](#)

- [15] Labrador Fafila X. *Técnico superior de esquí alpino, entrenador nacional de esquí y skiman de la Real Federación Española de deportes de invierno (RFEDI)*, (2018) [28](#)
- [16] Muñoz Capilla F. *Data processing Manager, director técnico de HEMAV S.L. y profesor de la Universitat Politècnica de Catalunya*, (2018) [34](#), [35](#)
- [17] Turner, J. "Lithium battery performance in cold temperatures". *Optibike*. **web**(<https://optibike.com/lithium-battery-performance-in-cold-temperatures/>), (2009) [44](#)
- [18] DJI "Adhesivo aislante para baterías". *INS2-Part.35*. **web**(<https://rc-innovations.es/dji-inspire-2-adhesivo-aislante-para-baterias-TB50-parte-35>), (2018) [45](#)
- [19] PNOA "Plan Nacional de Ortofotografía Aérea". *Ministerio de Fomento*. **web**(<http://pnoa.ign.es/>), (2018) [48](#)

---

#### OTRAS FUENTES DE INTERÉS:

- [20] SoloSki "Conocemos el sistema de control de Avalanchas de Grandvalira". *SoloSki*. **web**(<http://pnoa.ign.es/>), (2018)
- [21] Grand-valira "Plan Nacional de Ortofotografía Aérea". *Ministerio de Fomento*. **web**(<http://www.soloski.net/index.php/articulos/2318-conocemos-el-sistema-de-control-de-avalanchas-de-grandvalira>), (2018)
- [22] DJI S900 **web**(<https://www.multicopter.com/es/tienda-on-line/dji/dji-s900/dji-s900/>), (2018)
- [23] Anemómetro "Anemómetro-veleta Wind Sentry". *Campbell Scientific*. **web**(<https://www.campbellsci.es/03002-wind-sentry>), (2018)
- [24] Accidente en Baqueira "Pala Vinheta". *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya*. **web**(<http://www.icgc.cat/es/Administracion-y-empresa/Servicios/Aludes/Sobre-los-aludes/Accidentes-por-aludes/Val-d-Aran/Pala-Vinheta-28-11-2008>), (2008)
- [25] Pantoja L. "El Manto Nivoso". *REC Mountain*. **web**(<http://recmountain.com/el-manto-nivoso/>), (2017)
- [26] Defensa contra las aludes "Sistemas de defensa contra los aludes". *NevaSport*. **web**(<https://www.nevasport.com/reportajes/art/31710/Sistemas-de-defensa-contra-los-aludes/>), (2006)
- [27] AEMET "Guía para la observación nivometeorológica". *Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente*. **web**([http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/publicaciones/Guia\\_nivometeorologica/guia\\_nivometeorologica.pdf](http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/publicaciones/Guia_nivometeorologica/guia_nivometeorologica.pdf)), (2013)
- [28] Heil, N. "Más de 100 esquiadores murieron en los Alpes este invierno. ¿Fue un mal año o ya es la nueva norma?". *Vice Sports*. **web**([https://sports.vice.com/es\\_mx/article/vvawa3/mas-de-100-esquiadores-murieron-en-los-alpes-este-invierno-fue-un-mal-ano-o-ya-es-la-nueva-norma](https://sports.vice.com/es_mx/article/vvawa3/mas-de-100-esquiadores-murieron-en-los-alpes-este-invierno-fue-un-mal-ano-o-ya-es-la-nueva-norma)), (2015)

**Agradecemos también la implicación y la ayuda proporcionada por:**

- Xavier Labrador, por los conocimientos aportados y su disponibilidad durante todo el periodo de realización del proyecto.
- Adrià Martínez, por su colaboración en los montajes de los circuitos, y la información sobre el sistema de comunicación.
- Guillem, por su ayuda en la realización del vuelo experimental en Cardona.
- Marta Monfort y Javier Muñoz, por la información y referencias sobre las distintas interfaces utilizadas en esta iniciativa.
- HEMAV S.L, por proporcionar todos los materiales necesarios para las validaciones experimentales, por la colaboración por parte de los distintos departamentos y por la confianza depositada en nosotros a lo largo de la realización de este proyecto.





# **APÉNDICES**



## **APÉNDICE A. DATASHEETS**

### **A.1. Sensor de ultrasonidos SR50**

# Sensor de grosor de nieve (o distancia) Modelo SR50



## Descripción

El SR50 es un sensor para medida de distancia, robusto, que funciona por ultrasonidos. Mide el período de tiempo entre la emisión y recepción de un pulso ultrasónico. Puede ser utilizado para medir grosor de nieve o nivel; es conveniente realizar una medida de la temperatura del aire para corregir en función de la velocidad de propagación del sonido en el aire. Este sensor se fabrica en Campbell Scientific Canadá.

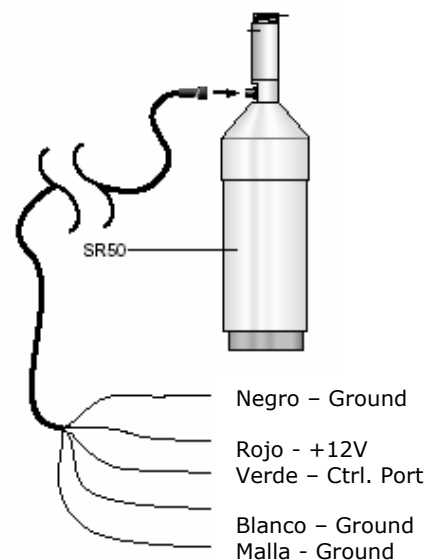
Basado en microprocesador, el SR50 utiliza un algoritmo único de tratamiento de la señal, que asegura la fiabilidad de la medida. El SR50 es compatible con los dataloggers Campbell Scientific. Dispone de salidas SDI-12, ASCII RS232 y pulsos.

## Características

<b>Tensión de alimentación:</b>	9 a 16Vdc
<b>Consumo eléctrico:</b>	2mA (en reposo) 250mA (pico)
<b>Tiempo de medida:</b>	Típico 0.6 sec/3.0 sec. máx.
<b>Señal de salida:</b> (conf. por "jumpers" internos)	SDI-12 Serie (ASCII) Tren de pulsos (0-5V)
<b>Rango de medida:</b>	0.5 a 10 metros
<b>Precisión:</b>	±1cm o 0.4% de la distancia al objetivo (la mayor de las dos)
<b>Resolución:</b>	0.1mm
<b>Ángulo del haz:</b>	Aproximadamente 22°
<b>Temp. de funcionamiento:</b>	-30 a +50°C -45 a +50°C (opcional)
<b>Longitud de cable máxima:</b>	60m (SDI-12); 300m (tren de impulso)
<b>Dimensiones:</b>	Longitud: 31cm Diámetro: 7.5cm
<b>Peso:</b>	1.3kg

## APLICACIONES

- Previsión aludes
- Agricultura
- Forestal
- Glaciología
- Carreteras
- Hidrología
- Meteorología
- Estaciones de esquí



## **A.2. Sensor de ultrasonidos HC-SR04**



Tech Support: [services@elecfreaks.com](mailto:services@elecfreaks.com)

## Ultrasonic Ranging Module HC - SR04

### Product features:

Ultrasonic ranging module HC - SR04 provides 2cm - 400cm non-contact measurement function, the ranging accuracy can reach to 3mm. The modules includes ultrasonic transmitters, receiver and control circuit. The basic principle of work:

- (1) Using IO trigger for at least 10us high level signal,
- (2) The Module automatically sends eight 40 kHz and detect whether there is a pulse signal back.
- (3) IF the signal back, through high level , time of high output IO duration is the time from sending ultrasonic to returning.

Test distance = (high level time×velocity of sound (340M/S) / 2,

### Wire connecting direct as following:

- 5V Supply
- Trigger Pulse Input
- Echo Pulse Output
- 0V Ground

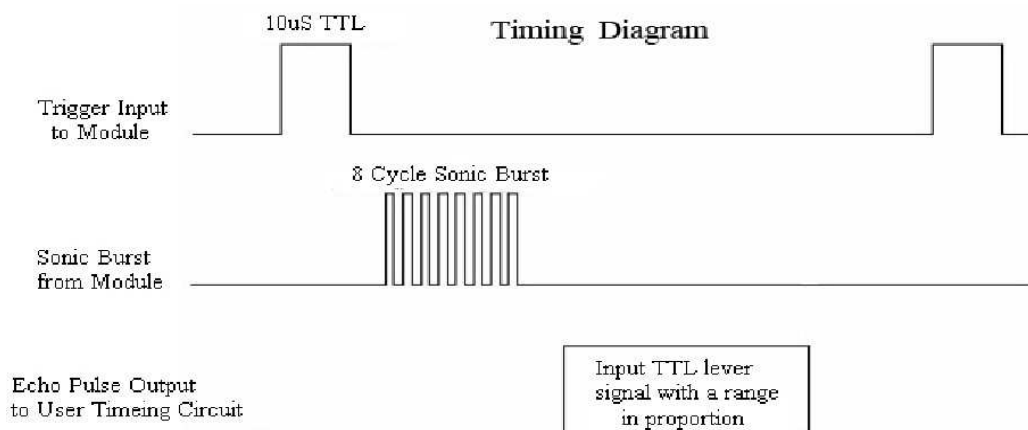
### Electric Parameter

Working Voltage	DC 5 V
Working Current	15mA
Working Frequency	40Hz
Max Range	4m
Min Range	2cm
MeasuringAngle	15 degree
Trigger Input Signal	10uS TTL pulse
Echo Output Signal	Input TTL lever signal and the range in proportion
Dimension	45*20*15mm



## Timing diagram

The Timing diagram is shown below. You only need to supply a short 10uS pulse to the trigger input to start the ranging, and then the module will send out an 8 cycle burst of ultrasound at 40 kHz and raise its echo. The Echo is a distance object that is pulse width and the range in proportion. You can calculate the range through the time interval between sending trigger signal and receiving echo signal. Formula:  $\mu\text{S} / 58 = \text{centimeters}$  or  $\mu\text{S} / 148 = \text{inch}$ ; or: the range = high level time \* velocity (340M/S) / 2; we suggest to use over 60ms measurement cycle, in order to prevent trigger signal to the echo signal.



### A.3. Sensor de ultrasonidos MB1040

#### Product Specifications:

- Resolution of 1 inch
- 20Hz reading rate
- 42kHz Ultrasonic sensor measures distance to objects
- RoHS Compliant
- Read from all 3 sensor outputs: Analog Voltage, RS232 Serial, Pulse Width
- Virtually no sensor dead zone, objects closer than 6 inches range as 6 inches
- Maximum Range of 254 inches (645 cm)
- Operates from 2.5-5.5V
- Low 2.0mA average current requirement
- Small, light weight module
- Designed for easy integration into your project or product
- Narrowest beam of the LV-MaxSonar-EZ sensors
- Best for large object detection applications



Figura A.1: Sensor de ultrasonidos MB1040.



## MB1040 LV-MaxSonar-EZ4

The LV-MaxSonar-EZ4 is the narrowest beam width sensor that is also the least sensitive to side objects offered in the LV-MaxSonar-EZ sensor line. The LV-MaxSonar-EZ4 is an excellent choice when only larger objects need to be detected.

# MB1040

## LV-MaxSonar®-EZ4™ Beam Pattern

Sample results for measured beam pattern are shown on a 30-cm grid. The detection pattern is shown for dowels of varying diameters that are placed in front of the sensor

**A** 6.1-mm (0.25-inch) diameter dowel

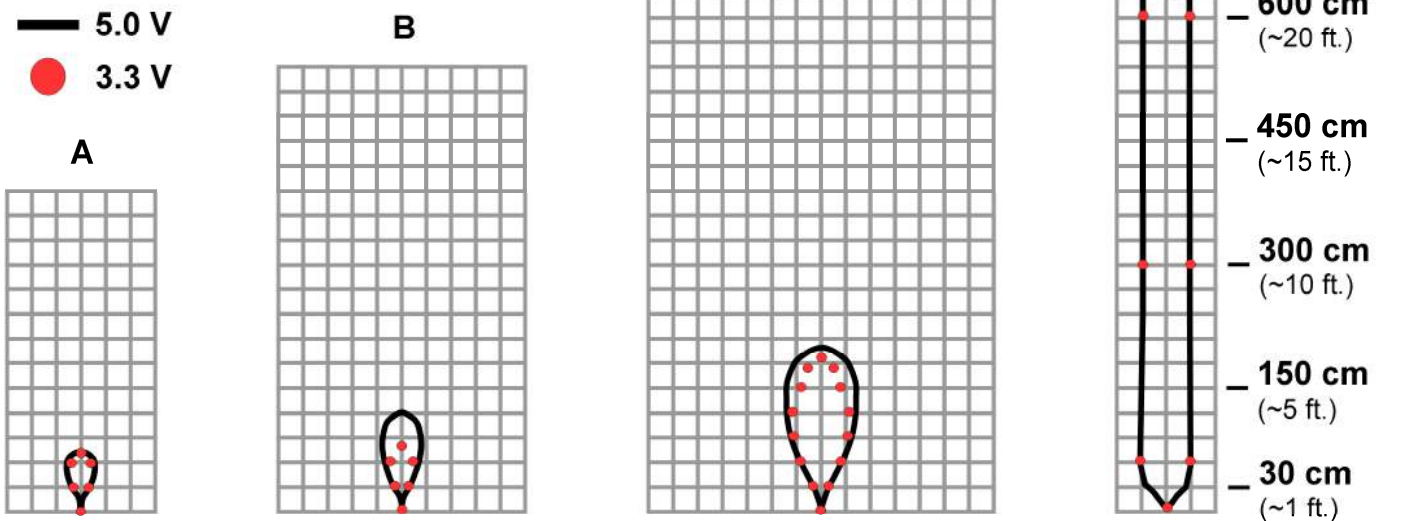
**B** 2.54-cm (1-inch) diameter dowel

**C** 8.89-cm (3.5-inch) diameter dowel

**D** 11-inch wide board moved left to right with the board parallel to the front sensor face.

This shows the sensor's range capability.

**Note:** For people detection the pattern typically falls between charts A and B.



**Beam Characteristics are Approximate**

Beam Pattern drawn to a 1:95 scale for easy comparison to our other products.

## MB1040 Features and Benefits

- Best side object rejection in the LV-MaxSonar-EZ sensor line
- Low power consumption
- Easy to use interface
- Best for large object detection
- Can be powered by many different types of power sources
- Can detect people up to approximately 4 feet

## MB1040 Applications and Uses

- Landing flying objects
- Used with battery power
- Autonomous navigation
- Educational and hobby robotics
- Collision avoidance

## A.4. Sensor de ultrasonidos JSN-SR04T-2.0

### Sensor Ultrasónico JSN-SR04T-2.0

---



Figura A.1.1. Sensor de distancia por ultrasonido a prueba de agua.

#### INFORMACIÓN GENERAL

El sensor JSN-SR04T-2.0 es un sensor de distancia que utiliza ultrasonido (sonar) para determinar la distancia de un objeto. Destaca por su pequeño tamaño, bajo consumo energético, buena precisión y especialmente por su resistencia al agua. Perfecto para aplicaciones donde el sensor estará expuesto a la intemperie.

#### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Modelo	JSN-SR04	Duración mínima del pulso	10 $\mu$ s
Voltaje de operación	5 V	Ángulo de detección	Menor a 50°
Corriente de trabajo	30 mA	Temperatura de trabajo	-10°C hasta 70°C
Frecuencia de emisión acústica	40 kHz	Precisión	5 mm

## **A.5. Sensor de temperatura DS18B20**

## DS18B20

## Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer

### General Description

The DS18B20 digital thermometer provides 9-bit to 12-bit Celsius temperature measurements and has an alarm function with nonvolatile user-programmable upper and lower trigger points. The DS18B20 communicates over a 1-Wire bus that by definition requires only one data line (and ground) for communication with a central microprocessor. In addition, the DS18B20 can derive power directly from the data line ("parasite power"), eliminating the need for an external power supply.

Each DS18B20 has a unique 64-bit serial code, which allows multiple DS18B20s to function on the same 1-Wire bus. Thus, it is simple to use one microprocessor to control many DS18B20s distributed over a large area. Applications that can benefit from this feature include HVAC environmental controls, temperature monitoring systems inside buildings, equipment, or machinery, and process monitoring and control systems.

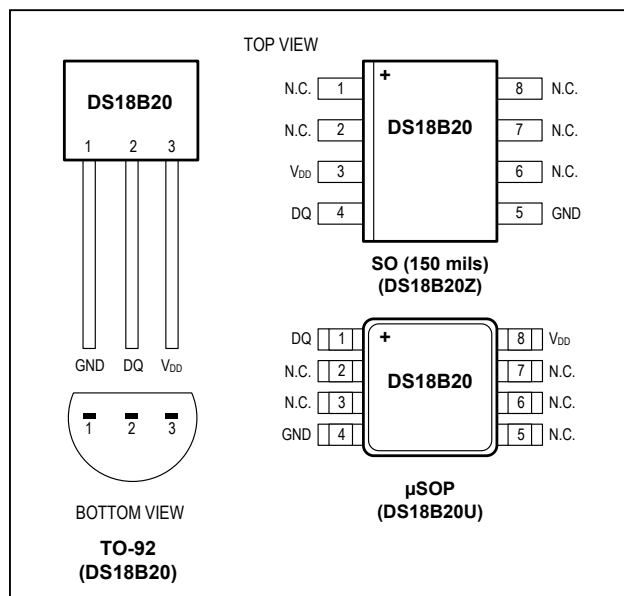
### Applications

- Thermostatic Controls
- Industrial Systems
- Consumer Products
- Thermometers
- Thermally Sensitive Systems

### Benefits and Features

- Unique 1-Wire® Interface Requires Only One Port Pin for Communication
- Reduce Component Count with Integrated Temperature Sensor and EEPROM
  - Measures Temperatures from -55°C to +125°C (-67°F to +257°F)
  - ±0.5°C Accuracy from -10°C to +85°C
  - Programmable Resolution from 9 Bits to 12 Bits
  - No External Components Required
- Parasitic Power Mode Requires Only 2 Pins for Operation (DQ and GND)
- Simplifies Distributed Temperature-Sensing Applications with Multidrop Capability
  - Each Device Has a Unique 64-Bit Serial Code Stored in On-Board ROM
- Flexible User-Definable Nonvolatile (NV) Alarm Settings with Alarm Search Command Identifies Devices with Temperatures Outside Programmed Limits
- Available in 8-Pin SO (150 mils), 8-Pin µSOP, and 3-Pin TO-92 Packages

### Pin Configurations



Ordering Information appears at end of data sheet.

1-Wire is a registered trademark of Maxim Integrated Products, Inc.

**Absolute Maximum Ratings**

Voltage Range on Any Pin Relative to Ground ..... -0.5V to +6.0V  
 Operating Temperature Range..... -55°C to +125°C

Storage Temperature Range..... -55°C to +125°C  
 Solder Temperature..... Refer to the IPC/JEDEC  
 J-STD-020 Specification.

*These are stress ratings only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operation sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods of time may affect reliability.*

**DC Electrical Characteristics**

(-55°C to +125°C;  $V_{DD}$  = 3.0V to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Supply Voltage	$V_{DD}$	Local power (Note 1)	+3.0		+5.5	V
Pullup Supply Voltage	$V_{PU}$	Parasite power	+3.0		+5.5	V
		Local power	+3.0		$V_{DD}$	
Thermometer Error	$t_{ERR}$	-10°C to +85°C			±0.5	°C
		-55°C to +125°C			±2	
Input Logic-Low	$V_{IL}$	(Notes 1, 4, 5)	-0.3		+0.8	V
Input Logic-High	$V_{IH}$	Local power	+2.2	The lower of 5.5 or $V_{DD} + 0.3$		V
		Parasite power	+3.0			
Sink Current	$I_L$	$V_{I/O} = 0.4V$	4.0			mA
Standby Current	$I_{DDS}$	(Notes 7, 8)		750	1000	nA
Active Current	$I_{DD}$	$V_{DD} = 5V$ (Note 9)		1	1.5	mA
DQ Input Current	$I_{DQ}$	(Note 10)		5		μA
Drift		(Note 11)		±0.2		°C

**Note 1:** All voltages are referenced to ground.

**Note 2:** The Pullup Supply Voltage specification assumes that the pullup device is ideal, and therefore the high level of the pullup is equal to  $V_{PU}$ . In order to meet the  $V_{IH}$  spec of the DS18B20, the actual supply rail for the strong pullup transistor must include margin for the voltage drop across the transistor when it is turned on; thus:  $V_{PU\_ACTUAL} = V_{PU\_IDEAL} + V_{TRANSISTOR}$ .

**Note 3:** See typical performance curve in [Figure 1](#).

**Note 4:** Logic-low voltages are specified at a sink current of 4mA.

**Note 5:** To guarantee a presence pulse under low voltage parasite power conditions,  $V_{ILMAX}$  may have to be reduced to as low as 0.5V.

**Note 6:** Logic-high voltages are specified at a source current of 1mA.

**Note 7:** Standby current specified up to +70°C. Standby current typically is 3μA at +125°C.

**Note 8:** To minimize  $I_{DDs}$ , DQ should be within the following ranges:  $GND \leq DQ \leq GND + 0.3V$  or  $V_{DD} - 0.3V \leq DQ \leq V_{DD}$ .

**Note 9:** Active current refers to supply current during active temperature conversions or EEPROM writes.

**Note 10:** DQ line is high ("high-Z" state).

**Note 11:** Drift data is based on a 1000-hour stress test at +125°C with  $V_{DD} = 5.5V$ .

## **A.6. Placa LoPy**

## LoPy 1.0

With LoRa, Wifi and BLE, the LoPy is the only triple bearer MicroPython enabled micro controller on the market today – the perfect enterprise grade IoT platform for your connected Things. With the latest Espressif chipset the LoPy offers a perfect combination of power, friendliness and flexibility. Create and connect your things everywhere. Fast.

## LoPy Features

- Powerful CPU, BLE and state of the art WiFi radio. 1KM Wifi Range
- Can also double up as a Nano LoRa gateway
- MicroPython enabled, the Linux o IoT for fast deployment
- Fits in a standard breadboard (with headers)
- Ultra-low power usage: a fraction compared to other connected micro controllers

## Processing

- Espressif ESP32 chipset
- Dual processor + WiFi radio System on Chip.
- Network processor handles the WiFi connectivity and the IPv6 stack.
- Main processor is entirely free to run the user application.
- An extra ULP-coprocessor that can monitor GPIOs, the ADC channels and control most of the internal peripherals during deep-sleep mode while only consuming 25uA.

## Operating Frequencies

- 868 MHz (Europe) at +14dBm maximum
- 915 MHz (North and South America, Australia and New Zealand) at +20dBm maximum

## Range Specification

- Node range: Up to 40km
- Nano-Gateway: Up to 22km
- Nano-Gateway Capacity: Up to 100 nodes

## Use the Pymakr IDE

Super easy code editor to write your Python scripts

## Quick Verification

For easy and fast debugging use the interactive shell that is accessible through telnet or one of the serial ports

## Easy Upload

Upload your scripts, and any other files you want to the LoPy via the FTP server

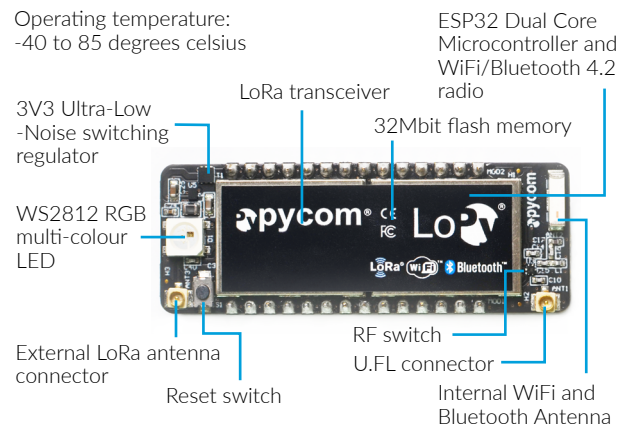
## Locally or remotely

Reset the LoPy (you can do it locally, or remotely via Telnet)

## Mechanical

Size: 55mm x 20mm x 3.5mm

Operating temperature:  
-40 to 85 degrees celsius



## Interfaces

- 2 x UART, 2 x SPI, I2C, I2S, micro SD card
- Analog channels: 8x12 bit ADCs
- Timers: 4x16 bit with PWM and input capture
- DMA on all peripherals
- GPIO: Up to 24

## Security & Certifications

- SSL/TLS support
- WPA Enterprise security
- FCC - 2AJMTWIPY2R
- CE 0700

## Memory

- RAM: 512KB
- External flash 4MB
- Hardware floating point acceleration.
- Python multi-threading.

## Power

- Input: 3.3V - 5.5V
- 3v3 output capable of sourcing up to 400mA
- Wi-Fi: 12mA in active mode, 5uA in standby
- Lora: 15mA in active mode, 10uA in standby

## LoRa Specification

- Semtech LoRa transceiver SX1272
- LoRaWAN stack
- Class A and C devices

With dozens of ready to use templates and libraries soon to be available on the Pycom Exchange, developing a new IoT solution is now easier and faster.

## Distributed by Pycom Ltd.

Copyright © 2016 by Pycom Ltd. All rights reserved. No part of this document may be reproduced, distributed, or transmitted in any form or by any means, including photocopying, recording, or other electronic or mechanical methods, without the prior written

permission of Pycom Ltd, except in the case of brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses permitted by copyright law.

To order contact [sales@pycom.io](mailto:sales@pycom.io)



## A.7. Mavic Pro Platinum

### MAVIC PRO PLATINUM

---



Figura A.1.2. DJI Mavic Pro Platinum

#### INFORMACIÓN GENERAL

El Mavic Pro Platinum presenta un diseño elegante y un cuerpo compacto. Un nuevo y mejorado tiempo de vuelo de 30 minutos junto con un 60% de reducción de la potencia de ruido, hace que de Mavic Pro Platinum DJI, el mejor dron portátil hasta ahora.

#### AERONAVE

Modelo	Mavic Pro Platinum	Sistemas de posicionamiento satelital	GPS/GLONASS
Peso (baterías y hélices incluidas)	743 g	Potencia del transmisor (EIRP)	FCC => 26 dBm; CE => 20 dBm
Velocidad máxima de ascenso	5 m/s	Tiempo máximo de vuelo	30 min

#### CONTROL REMOTO

Distancia máxima de transmisión	FCC: 7 km CE: 4 km	Potencia del transmisor (EIRP)	FCC => 26 dBm; CE => 20 dBm
---------------------------------	-----------------------	--------------------------------	--------------------------------

#### BATERÍA

Capacidad	3.830 mAh	Tipo de batería	LiPo 3S / 11,4 V
-----------	-----------	-----------------	------------------

## A.8. DJI S900

### DJI Spreading Wings S900

---



Figura A.1.3. *DJI Spreading Wings S900*

<b>INFORMACIÓN GENERAL</b>			
Los brazos y el tren de aterrizaje del dron S900 de DJI están hechos de fibra de carbono resistente, lo que reduce en gran medida el peso y aumenta la estabilidad y la fuerza. Esto permite un largo tiempo de vuelo sin sacrificar el rendimiento. Un hexacóptero profesional portátil y fácil de transportar.			

<b>AERONAVE</b>			
Modelo	DJI S900	Batería de potencia	LiPo 6S
Peso (incluido motor, ESC, hélice)	316 g	Corriente de trabajo (ESC)	40 A
Tiempo de vuelo	18 min	Peso total	3,3 kg



## **APÉNDICE B. TABLAS DEL PRONÓSTICO DE RIESGO DE ALUDES**









CARA NORTE	Viento	Sotavento									Barlovento									Sotavento								
	Orientación	Noreste (NE)									Noroeste (NW) <sup>1</sup>									Norte-Norte (NN)								
	Humedad	De 0 a 30			De 30 a 60			De 60 a 90			De 0 a 30			De 30 a 60			De 60 a 90			De 0 a 30			De 30 a 60			De 60 a 90		
	Temp. (°C)	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10
Inclinación (°)	60°	5 (Máxima acumulación de nieve por viento desde la cara NW y gran inclinación, se rompen más aludes.)						5 (La nieve es muy pesada, no se acumula tanto pero cae por su propio peso.)			3 (Nieve polvo, muy ligera. No acumulación. El viento se lleva la nieve.)			4 (El vidrio de nieve no se forma por la temperatura. Menor acumulación por viento.)			5 (Alta acumulación por viento de NW. Los aludes rompen por inclinación.)						5 (Alta humedad, nieve más pesada.)					
	45°										2 (Baja humedad y mucha inclinación, el viento se lleva la nieve.)			4 (Acumulación por nieve pesada debido a altas temperaturas y humedad.)														
	30°	4 (Más acumulación por viento que con 60°, no rompen tanto por inclinación sino por acumulación. A mayor humedad hay más cohesión por nieve más pesada y menor riesgo por poca inclinación.)						3			3 (Acumulación por baja inclinación pero se crea una capa de nieve dura en la parte superior del manto.)			3 (A más temperatura la nieve se cohesiona y pesa más, pero menor riesgo por poca inclinación.)			4 (Aludes rompen por acumulación, debido a poca inclinación. A mayor humedad la nieve se cohesiona más y disminuye el riesgo.)						3					
	25°	2 (Poca inclinación pero acumulación por sotavento. A mayor humedad hay más cohesión y disminuye el riesgo.)						1			1 (Poca inclinación, no se rompe si no hay acumulación.)									3 (Mayor riesgo que en NE, porque en NN no hay vegetación. Además, la nieve se congela antes ya que, por orografía, es la cara más fría de la montaña. Mayor humedad nos da más cohesión.)						2		

Viento		Barlovento									Sotavento									Sotavento								
Orientación		Noreste (NE) <sup>2</sup>									Noroeste (NW)									Norte-Norte (NN) <sup>3</sup>								
Humedad		De 0 a 30			De 30 a 60			De 60 a 90			De 0 a 30			De 30 a 60			De 60 a 90			De 0 a 30			De 30 a 60			De 60 a 90		
Temp. (°C)		-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10
Inclinación (°)	60°	4 (Nieve ligera, poca acumulación por barlovento y gran inclinación.)				4 (El vidrio no llega a formarse. Acumulación menor por barlovento. Mayor humedad, nieve más densa, aumenta el riesgo.)				5	5 (Máxima acumulación por viento desde NE. Al estar en sotavento y tener mucha inclinación, se rompen más aludes.)				5 (Nieve más pesada, cae por su peso, no tanto por acumulación.)				5 (Acumulación de nieve por viento de NE. Aludes rompen por la gran inclinación.)				5 (La nieve se vuelve más pesada y cae por su peso con el incremento de la humedad y las temperaturas.)					
	45°	3 (Baja humedad y mucha inclinación, el viento se lleva la nieve.)				4 (Mayor humedad, nieve más pesada. A mayor temperatura sube el riesgo.)				5																		
	30°	3 (Acumulación por poca inclinación. Capa de nieve dura sobre el manto.)				3 (Posibles aludes por nieve húmeda. Menor riesgo por poca inclinación.)					3 (Menor inclinación, aludes rompen más por acumulación. Aun así, al ser cara oeste que es más caliente, hay mayor cohesión y menos roturas.)								4 (Aludes rompen por acumulación. La nieve se va cohesionando cuando sube la humedad.)				3					
	25°	2 (Rompen por acumulación. Si sube la humedad y temperatura aumenta la cohesión, baja el riesgo.)								1	1 (Mayor acumulación por ser sotavento, pero poca inclinación. La nieve se cohesiona más.)								3 (La nieve se congela más rápido por ser la cara más fría de la montaña. Si suben la humedad y la temperatura, el riesgo baja.)				2					

Viento		Sotavento									Sotavento									Barlovento																	
Orientación		Noreste (NE)									Noroeste (NW)									Norte-Norte (NN) <sup>4</sup>																	
Humedad (%)		De 0 a 30			De 30 a 60			De 60 a 90			De 0 a 30			De 30 a 60			De 60 a 90			De 0 a 30			De 30 a 60			De 60 a 90											
Temp. (°C)		-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10												
Inclinación (°)	60°	5 (Gran inclinación y acumulación de nieve por viento desde NN.)						5 (Cuando aumenta la humedad la nieve se humedece y pesa más. Se rompen por su peso.)						5 (Los aludes rompen por inclinación y por la acumulación debido al viento de cara NN.)						5 (La nieve es más pesada, por lo que no se acumula tanto, pero cae por su propio peso.)						4 (Nieve muy ligera, poca acumulación debido a la inclinación.)						4 (Menor acumulación por tener barlovento.)					
	45°																									3 (Baja humedad y mucha inclinación, el viento se lleva la nieve poco densa.)						4 (Mayor acumulación, porque la nieve es más densa. El cristal de nieve no llega a formarse.)					
	30°	4 (Mayor acumulación que con 60°. La nieve se rompe por acumulación, no tanto por inclinación.)						3						3 (Gran acumulación por viento pero poca inclinación. Aun así, al ser cara oeste y tener sotavento, hay más cohesión y la nieve rompe menos.)						3 (Acumulación por poca inclinación, pero capa de nieve dura.)						3 (Mayor temperatura hay más acumulación, pero menor riesgo que a 45° porque la nieve pesa más y se cohesiona.)											
	25°	2 (Gran acumulación por ser una cara con sotavento. Disminuye el riesgo por la poca inclinación.)						1						1 (Existe más riesgo que si tenemos barlovento debido a una mayor acumulación. Aun así, el riesgo no es grande porque hay poca inclinación.)						3 (Mayor riesgo a 25° que en el NE o NW porque es la cara más fría de la montaña y el terreno es más arisco. En esta cara tendremos más hielo. Si sube la temperatura disminuye el riesgo.)						2											

CARA SUR	Viento	Sotavento									Barlovento									Sotavento																				
	Orientación	Sureste (SE) <sup>5</sup>									Suroeste (SW)									Sur-Sur (SS)																				
	Humedad (%)	De 0 a 30			De 30 a 60			De 60 a 90			De 0 a 30			De 30 a 60			De 60 a 90			De 0 a 30			De 30 a 60			De 60 a 90														
	Temp. (°C)	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10												
Inclinación (°)	60°	5 (Los aludes rompen por inclinación y por la acumulación debido al viento de cara NN.)						5 (La nieve es más pesada, por lo que no se acumula tanto, pero cae por su propio peso.)						3 (Gran inclinación, con nieve ligera.)						4 (No acaba de formarse hielo, pero rompe más.)						5			5 (Gran acumulación. Al ser SS el suelo está más caliente y hay más transformación diurna.)						5 (Acumulación por sotavento y nieve más pesada.)					
	45°													2 (No llega a acumularse la nieve, por la poca humedad y gran inclinación.)						4 (Nieve más pesada y mayor acumulación con mucha inclinación.)						5														
	30°	4 (Acumulación por viento de NW, la nieve rompe por viento y por temperatura de transformación.)						4 (Nieve pesada, más cohesión.)						3			2 (Zona generalmente más caliente por ser cara oeste, mayor cohesión de la nieve.)												3 (Mayor cohesión por ser una cara más caliente, pero hay sotavento.)						2					
	25°	2 (Mayor acumulación por sotavento, pero poca inclinación. A mayor humedad hay más cohesión.)												1			1 (La inclinación no es suficiente para que la nieve rompa sin gran acumulación.)												2 (Aunque tenemos sotavento el riesgo disminuye porque en las caras sur hay más vegetación, y en este caso poca inclinación.)						1					

CARA SUR	Viento	Barlovento									Sotavento									Sotavento								
	Orientación	Sureste (SE)									Suroeste (SW)									Sur-Sur (SS)								
	Humedad (%)	De 0 a 30			De 30 a 60			De 60 a 90			De 0 a 30			De 30 a 60			De 60 a 90			De 0 a 30			De 30 a 60			De 60 a 90		
	Temp. (°C)	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10
Inclinación (°)	60°	3 (Nieve ligera, no hay acumulación.)			4 (Se forma cristal de hielo por el ambiente frío. La nieve es más rompediza y ligera.)			5			5 (Acumulación por viento desde SE, aludes rompen con frecuencia por alta inclinación.)			5 (Nieve más pesada, no tanto por viento sino por peso.)			5 (Gran inclinación y notable acumulación por viento sotavento.)											
	45°	2 (Baja humedad y mucha inclinación. Baja el riesgo por la vegetación.)					3 (Nieve más densa, rompe por peso.)			4			3 (Más acumulación por viento al tener menos inclinación.)			4		5 pesada y menor cohesión por temperatura.)		4		4 (A baja humedad, el ambiente más cálido que en la cara norte, nieve más ligera.)			5 (Aun siendo una cara más cálida, la acumulación de nieve y la alta humedad aumentan el nivel de riesgo.)			
	30°	2 (Mayor cohesión al ser una cara más caliente.)															2 (Cara oeste con sotavento, mayor cohesión.)		3 (Mucha acumulación pero ambiente más cálido que en la cara norte, por lo que disminuye el riesgo. Para NN con sotavento el riesgo es mayor.)									
	25°	1 (No hay rotura si no hay gran acumulación.)												1 (Acumulación por baja inclinación. Mayor riesgo que al tener barlovento pero sin exceso.)						1 (Al ser cara Sur-Sur hay más vegetación, lo que estabiliza la generación de aludes.)								

CARA SUR	Viento	Sotavento									Sotavento									Barlovento																					
	Orientación	Sureste (SE)									Suroeste (SW)									Sur-Sur (SS)																					
	Humedad (%)	De 0 a 30			De 30 a 60			De 60 a 90			De 0 a 30			De 30 a 60			De 60 a 90			De 0 a 30			De 30 a 60			De 60 a 90															
	Temp. (°C)	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10	-20 a -10	-10 a 0	0 a +10													
Inclinación (°)	60°	5 (Máxima acumulación por viento desde la cara SS. Al ser cara sur, la zona es más caliente, por lo que hay mayor probabilidad de aludes por nieve pesada.)						5 (Alto riesgo por nieve pesada.)			5 (Gran acumulación por sotavento y mucha inclinación.)						5 (Aludes rompen por inclinación porque la nieve es más pesada.)						3 (Nieve ligera y terreno más suave que en caras norte.)						3 (Mayor humedad supone más riesgo.)			4		5							
	45°										3 (Mucha inclinación pero poca humedad, disminuye el riesgo. Cuando sube la humedad el riesgo va incrementando.)						4						5		5		4		3 (Poca humedad y gran inclinación, el viento se lleva la nieve.)						4 (La nieve empieza a ser más pesada.)					5	
	30°	4 (Aludes rompen por acumulación y por temperatura de transformación. A mayor humedad aumenta la cohesión y disminuye el riesgo.)						3			3 (Menor inclinación pero gran acumulación por viento.)						2 (Al ser cara oeste, por lo tanto una cara más caliente, y tener mayor humedad hay más cohesión.)						2 (Acumulación por poca inclinación, pero al ser cara caliente no hay tanta capa de hielo.)						2 (Nieve más pesada pero mucha vegetación.)								3				
	25°	2 (Acumulación de nieve por ser una cara con sotavento.)						1			1 (Mucha acumulación por ser sotavento pero poca inclinación. A mayor humedad y temperatura más cohesión.)						2 (A mayor temperatura el riesgo disminuye. Vegetación densa.)														1										

1. Al ser una cara oeste recibe el sol por la tarde. El sol de tarde en invierno calienta más que por la mañana, con lo que habrá más cohesión y disminuirá el riesgo.
2. Las caras noroeste son más frías porque el sol no las llega a calentar, debido a que cuando el sol llega al zenit ya empieza a calentar la cara oeste. Así, las caras este reciben el sol por la mañana, que no calienta tanto como el sol a partir de las 12.00h.
3. En las caras norte-norte, si el viento sopla desde el NE o el NW, se tendrá que mirar la localización geográfica de la montaña o sierra en particular, por si hay lagos a su alrededor, o está cerca del mar, ya que esto puede afectar en la humedad relativa del ambiente. Un ejemplo claro se da en los pirineos catalanes, donde el viento de NE es más húmedo porque viene desde el mar mediterráneo.
4. En las caras sur, la temperatura del suelo siempre es más caliente (temperaturas más altas durante el día), por lo que la nieve se transforma más rápido en nieve pesada (nieve primavera).
5. En las caras sur, si se orientan hacia el oeste, se reproducirá la misma situación que en el punto 1. El sol de invierno calienta más la cara oeste, por lo que hay más cohesión y el riesgo disminuye.

Apuntes: Como se puede observar a través de los valores de riesgo adjudicados en las tablas, las caras que reciben barlovento suelen tener valores de riesgo inferiores que las caras afectadas por sotavento. Además de esto, la orientación de las caras influye en dichos resultados. En las caras sur las temperaturas suelen ser más elevadas que en las caras norte, con lo que el suelo estará más caliente, y eso participa de manera directa en la cohesión de la nieve. Las caras sur también tienen mucha vegetación y menores inclinaciones, en comparación con las caras norte, las cuales son más frías y el terreno es arisco, con muchos desniveles. Esto hace que, por lo general, el nivel de riesgo en las caras sur sea ligeramente inferior al riesgo en el norte. La orientación de las caras además, influye en el periodo entre nevadas, con lo que, después de unas cuantas nevadas consecutivas, las tablas serán más fiables, ya que se tendrán referencias anteriores.

## APÉNDICE C. CODIGO DEL ALGORITMO IMPLEMENTADO EN DIGITALCOMBO

```
Data{1}(1) = 0;
Data{1}(2) = 0;
Data{1}(3) = 0;
fileID4 = fopen('DelGMFINAL.txt');
Data = textscan(fileID4, '%f %f %f');
fclose(fileID4);
fileID2 = fopen('CamTrigDistFINAL.txt');
fscanf(fileID2, '%s', 3);
DataBoundary = textscan(fileID2, '%f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f');
fclose(fileID2);
for n=length(DataBoundary{1}):-1:1
    if(DataBoundary{4}(n) == 206)
        Delay = DataBoundary{5}(n);
    end
    if(DataBoundary{4}(n) ~= 16 || DataBoundary{2}(n) == 1)
        DataBoundary{1}(n) = [];
        DataBoundary{2}(n) = [];
        DataBoundary{3}(n) = [];
        DataBoundary{4}(n) = [];
        DataBoundary{5}(n) = [];
        DataBoundary{6}(n) = [];
        DataBoundary{7}(n) = [];
        DataBoundary{8}(n) = [];
        DataBoundary{9}(n) = [];
        DataBoundary{10}(n) = [];
        DataBoundary{11}(n) = [];
        DataBoundary{12}(n) = [];
    end
end
DiffLOW(1) = 1000;
for n=2:1:length(Data{3})
    DiffLOW(n) = abs(Data{3}(n)-Data{3}(n-1));
end
for n=1:1:(length(Data{3})-1)
    DiffUP(n) = abs(Data{3}(n)-Data{3}(n+1));
end
DiffUP(length(Data{3})) = 1000;
cota = sum(DiffUP(1:length(DiffUP)-1))/(length(DiffUP)-1);
Data2 = Data;
for n=length(Data{3})-1:-1:2
    intoc = 0;
    if isempty(find(DataBoundary{9}==Data{1}(n),1))==0 &&...
        isempty(find(DataBoundary{10}==Data{2}(n),1))==0
```

```

        intoc = 1;
    end
    if(fliplr(DiffLOW(n))<=cota && fliplr(DiffUP(n))<=cota && intoc==0)
        Data2{1}(n) = [];
        Data2{2}(n) = [];
        Data2{3}(n) = [];
    else
        Data2{1}(n) = Data{1}(n);
        Data2{2}(n) = Data{2}(n);
        Data2{3}(n) = Data{3}(n);
    end
end
fileID3 = fopen('Al_Global Mapper.txt','wt');
for n = 1:1:length(Data2{3})
    fprintf(fileID3, '%f', Data2{1}(n));
    fprintf(fileID3, '\t%f', Data2{2}(n));
    fprintf(fileID3, '\t%f', Data2{3}(n));
    fprintf(fileID3, '\n');
end
fclose(fileID3);
Alt = 100;
Vel = 6;
fileID = fopen('Ground_Tracking_FlightplanALL.txt','wt');
fprintf(fileID, 'QGC WPL 110');
fprintf(fileID, '\n%i', 0);
fprintf(fileID, '\t%i', 1);
fprintf(fileID, '\t%i', 0);
fprintf(fileID, '\t%i', 16);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%f', Data{1}(1));
fprintf(fileID, '\t%f', Data{2}(1));
fprintf(fileID, '\t%f', Data{3}(1)+Alt);
fprintf(fileID, '\t%i', 1);
fprintf(fileID, '\n%i', 1);
fprintf(fileID, '\t%i', 0);
fprintf(fileID, '\t%i', 0);
fprintf(fileID, '\t%i', 22);
fprintf(fileID, '\t%f', 20);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%f', 30);
fprintf(fileID, '\t%i', 1);

```

```

fprintf(fileID, '\n%i', 2);
fprintf(fileID, '\t%i', 0);
fprintf(fileID, '\t%i', 0);
fprintf(fileID, '\t%i', 178);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%f', Vel);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%i', 1);
fprintf(fileID, '\n%i', 3);
fprintf(fileID, '\t%i', 0);
fprintf(fileID, '\t%i', 0);
fprintf(fileID, '\t%i', 16);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%f', Data{1}(1));
fprintf(fileID, '\t%f', Data{2}(1));
fprintf(fileID, '\t%f', Data{3}(1)+Alt);
fprintf(fileID, '\t%i', 1);
fprintf(fileID, '\n%i', 4);
fprintf(fileID, '\t%i', 0);
fprintf(fileID, '\t%i', 0);
fprintf(fileID, '\t%i', 206);
fprintf(fileID, '\t%f', Delay);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%i', 1);
for n = 2:1:length(Data{1})
fprintf(fileID, '\n%i', n+3);
fprintf(fileID, '\t%i', 0);
fprintf(fileID, '\t%i', 0);
fprintf(fileID, '\t%i', 16);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%f', 0);
fprintf(fileID, '\t%f', Data{1}(n));
fprintf(fileID, '\t%f', Data{2}(n));
fprintf(fileID, '\t%f', Data{3}(n)+Alt);

```

[illegible]